

N° d'Ordre :
378

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

MAURICE **EZRAN**

INGÉNIEUR E.N.S.E.M.
LICENCE ES SCIENCES

1^{re} THÈSE : *Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées*

2^{me} THÈSE : *Propositions données par la Faculté*

Soutenues le 11 Juin 1952 devant la Commission d'examen.

M. THIRY

Président

M^{me} JOLIOU - CURIE

M. LUCAS

M. CAPELLE

} Examineurs

N° d'Ordre :
378

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

MAURICE **EZRAN**

INGÉNIEUR E.N.S.E.M.
LICENCIÉ ES SCIENCES

1^{re} THÈSE : *Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées*

2^{ème} THÈSE : *Propositions données par la Faculté*

Soutenues le 11 Juin 1952 devant la Commission d'examen.

M. THIRY

Président

M^{me} JOLIOT - CURIE

M. LUCAS

Examineurs

M. CAPELLE

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen M:A.CHATELET

PROFESSEURS

G.JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure	KASTLER	T	Physique
A.DENJOY	T	Théorie des Fonctions	CHATELET	T	Arithmétique et théorie des nombres
L.LUTAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique	EPHRUSSI	T	Génétique
E.DARMOIS	T	Enseignement de Physique	WURMSER	T	Biologie physico-chimique
Robert LEVY	T	Physiologie comparée	BAUER	T	Chimie-physique
Me RAMART-LUCAS	T	Chimie organique	RIVIERE		Géologie (P.C.B.)
FOCH	T	Mécanique physique et expérimentale	GAUTHERET	T	Biologie Végétale (P.C.B.)
PAUTHENIER	T	Electrotechnique générale	LUCAS	T	Physique
DE BROGLIE	T	Théories physiques	A. THOMAS	T	Evolution des êtres organisés
JOB	T	Chimie générale	ARNULF		Optique appliquée
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées	Max MORAND		Physique
COMBES	T	Physiologie végétale	SOLEILLET		Physique
GARNIER	T	Géométrie supérieure	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides
PERES	T	Mécanique des fluides et applications	DANJON	T	Astronomie
LAUGIER	T	Physiologie générale	FROMAGEOT	T	Chimie biologique
TOUSSAINT	T	Technique Aéronautique	LAPORTE	T	Physique générale & radioactivité
M. CURIE	T	Physique (P.C.B.)	JANET	T	Mathématiques générales
G. RIBAUD	T	Hautes températures	PETIT	T	Biologie maritime
CHAZY	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste	QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique
CROZE	T	Physique théorique et physique céleste	GALLIEN	T	Biologie animale (P.C.B.)
DUPONT	T	Théories chimiques	EICHHORN		Biologie végétale (P.C.B.)
VALIRON	T	Calcul différentiel et calcul intégral	DE CUGNAC		Biologie végétale (P.C.B.)
BARRABE	T	Géologie structurale & géologie appliquée	Melle CAUCHOIS	T	Chimie-Physique
VAVON	T	Analyse et mesures chimiques	THELLIER		Physique du globe
G.DARMOIS	T	Calcul des probabilités & physique mathématique	AUDUBERT		Electrochimie
Jacques BOURCART	T	Géographie physique & Géologie dynamique	L'HERITIER		Génétique
AUBEL	T	Chimie biologique	GRIVET	T	Radioélectricité
Me JOLIOT-CURIE	T	Physique générale et radioactivité	PONCIN		Mécanique des fluides
PLANTEFOL	T	Botanique	THIRY	T	Mécanique appliquée
CABANNES	T	Recherches physiques	DUBREIL		Mathématiques générales
GRASSE	T	Evolution des êtres organisés	QUELET		Chimie (P.C.B.)
PREVOST	T	Chimie organique	CAGNIARD		Géophysique appliquée
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la Géométrie	CHAMPETIER		Chimie appliquée
CHAUDRON	T	Chimie appliquée	CUVILLIER		Géologie structurale & Géologie appliquée
WYART	T	Minéralogie	JUNG	T	Pétrographie
TEISSIER	T	Zoologie	TRILLAT		Physique (P.C.B.)
MANGENOT	T	Biologie végétale	WIEMANN		Chimie (P.C.B.)
P.AUGER	T	Physique quantique & relativité	LICHNEROWICZ		Mathématiques générales
MONNIER		Physiologie générale	JACQUINOT	T	Physique (P.C.B.)
PIVETEAU	T	Géologie	VASSY		Physique de l'atmosphère
ROCARD	T	Physique	DESTOUCHES		Théories physiques
H. CARTAN	T	Mathématique (E.N. Supérieure)	M. PRUVOST	T	Géologie
SCHAEFEER	T	Physiologie des Fonctions	AMIEL		Chimie (P.C.B.)
LAFFITTE	T	Chimie générale	HOCART		Minéralogie
FAVARD	T	Mécanique générale	MACHEBOEUF		Microbiologie
COULOMB	T	Physique du globe	J.P.MATHIEU		Physique (P.C.B.)
Mlle COUSIN	T	Biologie animale (P.C.B.)	COUTEAUX		Biologie animale (P.C.B.)
CHRETIEN	T	Chimie minérale	MAY		Biologie animale (P.C.B.)
P. DRACH	T	Zoologie	CHOQUET		Calcul différentiel
			FELDMANN		Biologie (P.C.B.)
			GUINIER		Physique (P.C.B.)
			JOST		Biologie (P.C.B.)

Secrétaire Ch. MONIER



A Monsieur J. CAPELLE, Recteur de
l'Académie de Nancy

qui dirigea mes travaux,
en hommage respectueux

A ma chère Femme et
à mes Parents

A tous mes Collaborateurs
et Amis



Digitized by the Internet Archive
in 2026

A MM. CHAMPETIER, JANVIER et BERTHOUD,
de la Station d'Essais de Machines-Outils

qui m'ont permis la réalisation matérielle
de mes recherches

A Monsieur P. DUBOIS, Directeur
du Centre d'Etudes des Matières
Plastiques

pour toute l'aide précieuse qu'il
m'a fournie

A MM. GUERON, LEVEQUE et HOURS,
du Commissariat à l'Energie Atomique

A M. M. MATHIEU de l'O.N.E.R.A.

A M. ZANDMAN de l'Institut de
Mécanique de la Faculté des Sciences

A M. DAUPHIN du Laboratoire du
Bâtiment et des Travaux Publics

Pour leur aimable collaboration

La Rédaction et la Présentation de ce Travail
n'auraient pas été possibles sans le concours
à la Station d'Essais de Machines-Outils
de Mme CHARBONNIER qui m'a tapé mes manuscrits,
de MM. SOLVENTO et DAUGUET qui m'ont dessiné mes croquis.

Je les remercie bien sincèrement

INTRODUCTION

1 - IMPORTANCE DES PHENOMENES D'USURE .

L'importance de l'étude des phénomènes d'usure ne fait plus aucun doute de nos jours. Les développements de la technique amenant à un outillage de plus en plus complexe, de nombreuses pièces de ces machines sont soumises à des efforts très divers. Dans le cas où ces organes ont été mal calculés ou bien dans celui où ils possèdent des défauts de fabrication ou de montage, il se produit des ruptures à plus ou moins brève échéance. Cependant, dans le cas contraire où cet organe est bien à sa place, dans de bonnes conditions d'utilisation, on assiste à un phénomène d'usure ou de corrosion qui fait qu'il doit être renouvelé au bout d'un temps sans doute plus long que dans le premier cas, mais qui n'en demeure pas moins un facteur important dans les services d'entretien des usines.

La résistance des matériaux classiques prévoit les cas de rupture et donne des directives pour l'éviter; cependant, elle est d'un faible secours pour la prévision de l'usure. C'est la raison pour laquelle des organes de machine, bien calculés et bien montés, sont hors d'usage au bout de temps assez courts, faute d'étude rationnelle du phénomène d'usure.

2 - HISTORIQUE

Les considérations générales citées ci-dessus n'ont pas échappé à de nombreux techniciens intéressés par ce problème. C'est la raison pour laquelle un certain nombre d'entre eux se sont attachés à l'étudier. La diversité des méthodes et des résultats acquis est une preuve de la complexité de ces phénomènes.

En 1873, Bottone dans les "Chemical News" utilise l'usure pour définir la dureté des métaux cassants. Il appuie ce métal sur un disque tournant à vitesse constante et pression d'appui constante. Il mesure le temps nécessaire pour faire une entaille de profondeur déterminée. Il en conclut que la dureté est proportionnelle au temps pour faire l'empreinte. Ceci est faux, la résistance à l'usure dépendant d'autres facteurs comme la déformabilité du métal.

En 1878, Dudley fit des expériences d'usure des rails sur chantier et définit quelques critères d'usure : structure du métal, résistance à la traction, etc ...

En 1908, Stanton, dans le "Journal of the Iron and Steel Institute", publie une étude sur l'usure d'aciers soumis à la flexion et à l'usure à l'aide d'une éprouvette en forme d'anneau s'appuyant sur trois galets cylindriques. Il étudie, en particulier, l'écrouissage.

En 1908 également, Sanita, dans le même journal, publie un mémoire sur les essais d'usure sur des éprouvettes cylindriques tournant à grande vitesse.

En 1921 Brinell publie ses essais d'usure à l'aide d'un disque s'appuyant contre une pièce et entraînant un abrasif. Il mesurait la résistance à l'usure d'après le volume de segment de métal enlevé.

Plus tard, en 1937, un "Symposium of Wear" s'est tenu aux Etats-Unis pour résumer les travaux effectués. Il dénote l'intérêt croissant que l'on avait pour l'étude de ces phénomènes.

Les études sur l'usure ont été assez rares en France. Il est, de ce fait, assez difficile de retrouver les publications faites. Notons cependant, depuis 1948, l'étude sur l'usure des bâtis en fonte de machines-outils qui est effectuée par la Station d'Essais de Machines - Outils en liaison avec le Centre Technique de la Fonderie et dont le but est d'arriver à déterminer les meilleures fontes résistant à l'usure pour les glissières de toutes les machines-outils.

D'autres études sont effectuées un peu partout sur des pièces d'utilisation différente comme les outils de coupe des métaux où l'usure a un caractère un peu spécial.

3 - NECESSITE DE L'ETUDE DE L'USURE DES ENGRENAGES.

Les engrenages sont des organes de machines particulièrement soumis aux phénomènes d'usure de par la nature de leur fonctionnement. Les théories cinématiques sur les engrenages de toutes sortes nous montrent que les surfaces en contact roulent ou glissent les unes sur les autres, suivant le cas, ceci amène forcément de l'usure. Cette usure est d'autant plus importante à étudier que beaucoup d'engrenages sont destinés à travailler sans interruption et le problème de leur durée de fonctionnement se pose très nettement.

Un certain nombre de travaux ont été effectués en ce sens par divers procédés. Citons tout d'abord, les remarquables travaux effectués au "Massachusetts Institute of Technology" (U.S.A.), et qui ont été publiés en mai 1944 dans les "Transactions of the A.S.M.E." (American Society of Mechanical Engineers) par le professeur E. BUCKINGHAM. Dans ces essais, une étude très poussée de la résistance à l'usure a été faite sur des aciers et d'autres métaux non ferreux. Il y a mis en évidence l'existence de piqûres destructrices des dents d'engrenages ainsi que les conditions de leur formation. Il y discerne la piqûre naissante de la piqûre destructrice.

D'autres essais ont été effectués par la société suisse "Brown Boveri" et publiés dans la revue B.B.C., octobre 1939. Ils apportent également des précisions sur la formation des piqûres destructrices dans les dents d'engrenages.

Ces faits ont été repris par M. Warren, Ingénieur à la General Electric Company, Schenectady (U.S.A.) qui a donné une théorie sur la formation des piqûres basée sur l'état des contraintes dans la denture au voisinage du point de contact.

D'autres essais du même genre ont été effectués; citons pour mémoire :

- 1 - Un article par H.D. Mansion dans "Automobile Engineer", Octobre 1941
- 2 - Un communiqué de M. Stewart Way au 24^{ème} Congrès de l'Association Américaine des fabricants d'engrenages, en Mai 1940.

4 - CAS DES ENGRENAGES EN PLASTIQUE STRATIFIE -

Toutes ces études citées ci-dessus n'ont pas abordé une catégorie d'engrenages qui prend de plus en plus d'extension de nos jours; c'est les engrenages en résines synthétiques stratifiées. Le grand développement des industries des matières plastiques et l'introduction de ces produits en mécanique ont amené forcément les techniciens à étudier des engrenages faits en matière plus souple que les métaux et, par conséquent, moins soumise à des vibrations, à des efforts dynamiques.

Les résines synthétiques à base de phénol formaldéhyde (connu communément sous le nom de bakélite) se sont avérées être les meilleures lorsqu'elles servaient d'agglomérant à une trame faite de tissu de coton ou de feuilles de bois. On imprègne de résine phénolique le tissu ou le bois, on en fait les couches qui, fortement comprimées, donnent un matériau compact, essentiellement anisotrope, de grande solidité et de densité 1,2 à 1,5.

Ces produits servent à faire des engrenages de petites et moyennes dimensions dont l'usage tend à se répandre à cause des avantages qu'ils présentent sur les engrenages métalliques surtout pour les faibles charges.

Le problème de la résistance à l'usure de ces engrenages se pose également avec beaucoup d'acuité car on sait bien peu de choses sur les caractéristiques de ces matériaux. Encore plus que dans les engrenages métalliques, leur utilisation, dans les conditions de résistance à l'usure inconnues, peut amener à des erreurs regrettables et coûteuses. Il est nécessaire de savoir avec précision quelles sont les meilleures conditions de fonctionnement pour un plastique donné et comment calculer un engrenage en connaissant ces conditions.

Les essais d'usure d'engrenages en plastique ont été très peu nombreux. On peut citer principalement ceux de QPITZ et HESSE à Aix-la-Chapelle et publiés en septembre 1942 dans la revue "Kunststoffe". Ils ont donné quelques résultats concernant l'usure de cette catégorie d'engrenages et les facteurs dont elle dépend.

5 - BUTS DE LA THESE

Les buts que se propose d'atteindre cette thèse sont les suivants :

- a - Etudier en détail le comportement à l'usure des engrenages en plastique stratifié de différentes espèces et de voir quelles directives pratiques peut bénéficier l'industrie par la connaissance du phénomène d'usure.
- b - Rechercher quelles sont les charges maxima compatibles avec une usure normale que peut supporter un engrenage donné : c'est la charge d'endurance limite déjà définie pour les métaux.
- c - Etudier le mécanisme du phénomène d'usure, l'influence de l'élasticité des matériaux employés, de l'état de surface, des contraintes de contact, etc ...
- d - Analyser les différentes méthodes de mesure de l'usure et y apporter les perfectionnements nécessaires à cette étude.
- e - Prévoir, dans la mesure du possible, l'usure probable d'un engrenage et prendre les mesures nécessaires pour la limiter.

L'usure est un phénomène qui se présente sous trois formes principales :

- a) - Usure par glissement
- b) - Usure par roulement
- c) - Usure par abrasion.

On rencontre, le plus souvent, des formes combinées de ces trois cas. En ce qui concerne les engrenages, deux types d'usure se présentent :

- 1 - L'usure par roulement et glissement.
- 2 - L'usure par roulement pur.

C'est à ces deux cas que sera limité le sujet de la thèse car ce sont les seuls nous intéressant directement.

6 - PLAN ADOPTE -

Le plan adopté est déduit des buts que se propose la thèse; il comprend 5 parties :

- A - Généralités sur les phénomènes d'usure. Etude de la dispersion des résultats, étude de l'élasticité des matériaux.
- B - Etude du phénomène d'usure sur différents matériaux, dans toutes les conditions cinématiques prévues
- C - Etude des conditions de contact des dentures.
- D - Etude des faibles usures par utilisation des radio isotopes.
- E - Conclusions et directives générales.



GENERALITES SUR LES PHENOMENES
D'USURE

DIVERS PROCÉDES D'ÉTUDE DE L'USURE DES ENGRENAGES

1 - PROCÉDE DE MESURE DIRECTE -

Ce système d'étude qui est le plus immédiat consiste à pratiquer des essais sur des engrenages tournant à des vitesses déterminées et auxquels on applique des efforts connus.

Deux engrenages E_1 et E_2 (figure 1) sont montés sur les arbres F et G formant barres de torsion.

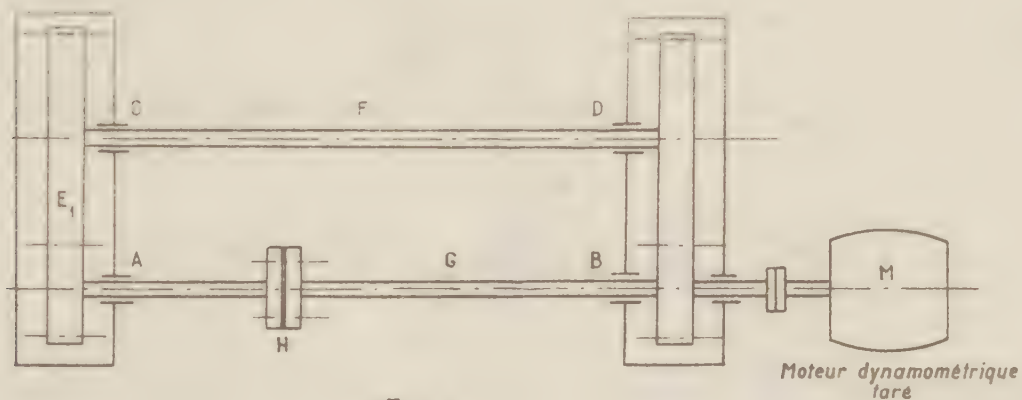


Fig.1

On donne une torsion à l'arbre AB en H ce qui réalise le couple qu'on désire obtenir. Un moteur M entraîne l'ensemble. On peut alors étudier l'usure après un certain temps de fonctionnement en contrôlant la diminution d'épaisseur des dents et les variations du profil.

Cet appareil a été utilisé par OPITZ et HESSE qui ont publié leurs résultats dans "Kunststoffe" (Septembre 1942). Ils ont étudié l'usure en fonction de 3 paramètres :

- 1 - Vitesse linéaire du primitif
- 2 - Charge circonférentielle
- 3 - Module.

Ils ont étudié des engrenages en bois bakélisé ou en tissu imprégné; ils ont déterminé l'usure absolue mesurée par la distance du profil après usure du profil initial et l'usure relative définie comme le quotient de l'usure absolue par l'épaisseur de la dent.

Les auteurs étudient l'usure relative en fonction du module et donnent un module optimum où l'usure est la plus faible.

Ces résultats pour être intéressants n'en demeurent pas moins empiriques car ils étudient le phénomène d'usure globalement, sans essayer d'en faire une analyse, ils ne peuvent donc être généralisés à des cas différents de ceux étudiés.

2 - PROCEDE DU M.I.T.

Les essais effectués par le professeur BUCKINGHAM du M.I.T. se basent sur une propriété cinématique bien connue des dentures d'engrenages, qui est la suivante :

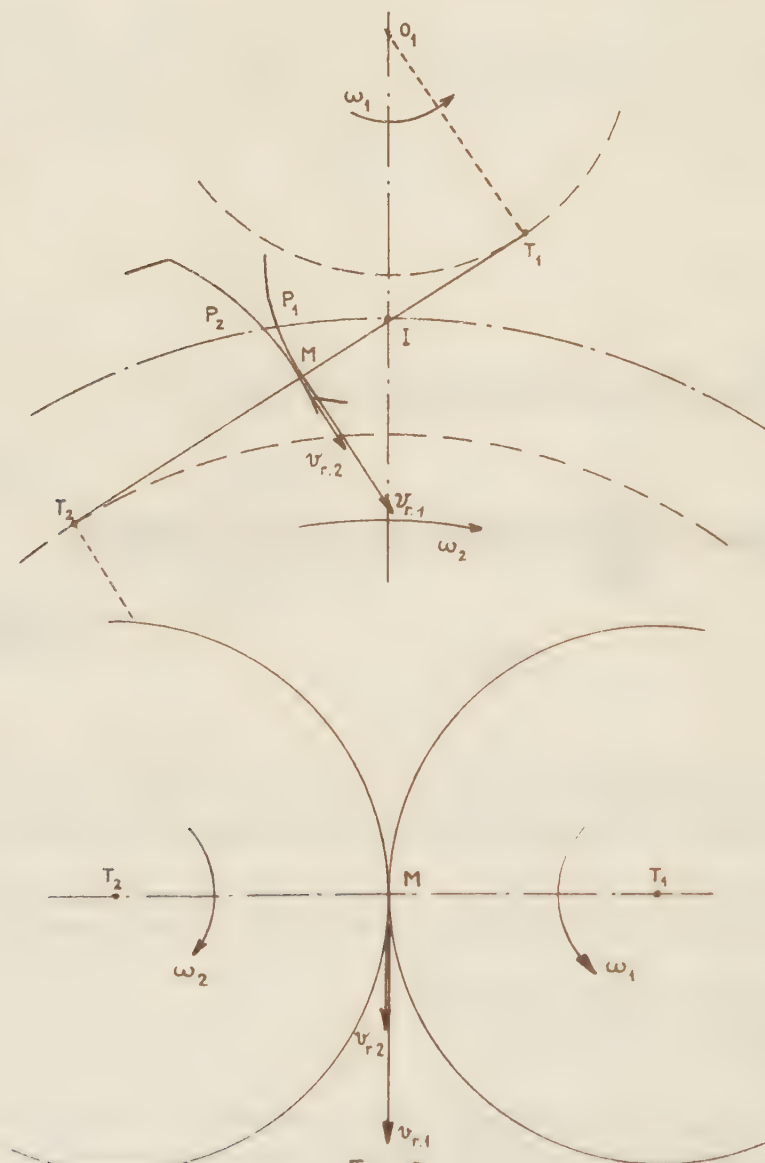


Fig. 2

En un point de contact quelconque de deux dentures conjuguées, on peut remplacer les profils en développante de cercle par des cercles ayant même rayon de courbure et animés de mouvements de rotation et de glissement identiques à ceux des dentures au point de contact considéré.

En effet, soit deux profils conjugués P_1 et P_2 en contact au point M (Figure 2).

Si $V_{r.1}$ et $V_{r.2}$ sont les vitesses de roulement (ou vitesses tangentielles en M), on a :

$$V_{r.1} = \omega_1 T_1 M$$

$$V_{r.2} = \omega_2 T_2 M$$

ω_1 et ω_2 étant les vitesses de rotation des deux pignons.

La vitesse de glissement V_g de P_1 par rapport à P_2 sera :

$$V_g \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = V_{r.1} - V_{r.2}$$

La vitesse de glissement de P_2 par rapport à P_1 sera opposée à celle-ci.

$$V_g \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = V_{r.2} - V_{r.1}$$

Au point I de contact des cercles primitifs, on aura :

$$V_{r.1} = V_{r.2}$$

car

$$\omega_1 I T_1 = \omega_2 I T_2 \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{I T_2}{I T_1}$$

et

$$V_g = 0$$

On peut facilement remplacer les deux développantes de cercles P_1 et P_2 par deux galets de caractéristiques suivantes :

a - Un galet de centre T_1 , de rayon $T_1 M$ égal au rayon de courbure de P_1 en M , de vitesse angulaire ω_1

b - Un galet de centre T_2 , de rayon $T_2 M$ égal au rayon de courbure de P_2 en M , de vitesse angulaire ω_2

On aura bien :

$$V_{r.1} = \omega_1 T_1 M$$

$$V_{r.2} = \omega_2 T_2 M$$

et

$$V_g \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = V_{r.1} - V_{r.2}$$

On aura reproduit les conditions de fonctionnement des engrenages. Si on applique à ces galets une pression le long de $T_1 T_2$ égale à la pression due au couple le long de la ligne d'action, on réalisera les conditions cinématiques et dynamiques de la denture avec des surfaces géométriquement plus simples.

Des essais à partir de cette méthode ont été réalisés au M.I.T. avec un montage comprenant deux galets cylindriques montés sur des arbres parallèles et pressés l'un contre l'autre. Les deux arbres étaient associés par un harnais d'engrenages de façon à leur imposer des vitesses ω_1 et ω_2 , l'entraxe mobile permettant de donner les rayons désirés aux galets; on réalisait ainsi toutes les vitesses de glissement nécessaires. Un ressort taré donnait la pression voulue.

De nombreux essais ont été effectués sur tous genres de matériaux spécialement sur des fontes, sur des aciers et sur des métaux non ferreux. Une charge d'endurance limite a pu être définie comme la plus grande charge permettant de réaliser 30×10^6 cycles sans détérioration apparente de la surface. C'est ainsi que le professeur Buckingham trouve 28 kg/mm de charge d'endurance pour la fonte grise, 32 kg/mm pour la fonte au nickel. Une méthode de calcul permet, à partir de ces données, de déterminer quelle est la pression que peut supporter un engrenage; elle sera exposée plus tard. Elle consiste à calculer la contrainte superficielle du galet puis de voir quelle charge il faut appliquer à un engrenage donné pour obtenir cette même contrainte dans la denture.

Les essais du professeur Buckingham ont permis de mettre en évidence l'existence des piqûres dans les dentures, de les localiser dans différents cas. Ils constituent la première étude systématique de ces phénomènes d'usure d'engrenages métalliques.

3 - PROCEDE BROWN-BOVERI -

La Société Brown-Boveri a utilisé un appareil basé sur le même principe que celui du M.I.T. (Figure 3). La société a fait beaucoup d'essais sur l'influence des lubrifiants sur

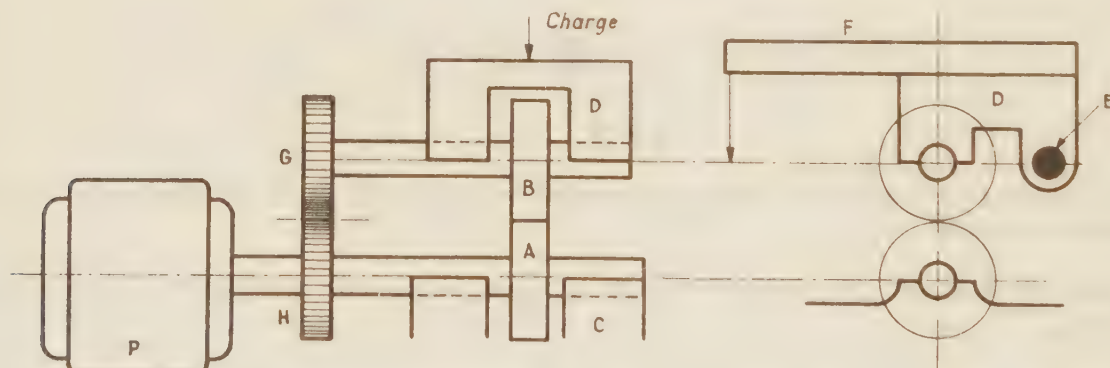


Fig. 3

les dentures. Elle a établi que si on fait rouler et glisser les galets l'un sur l'autre, c'est le galet le plus lent qui aura le plus vite des piqûres. Ceci se vérifie sur les dentures on observe toujours les piqûres dans le creux des dentures où la vitesse de roulement est plus faible que sur la tête de denture conjuguée.

La Société "Brown-Boveri" a travaillé avec des galets en acier roulant sous une pression de 27 kg/mm à une vitesse de 1 000 tours/minute. Les crevasses apparaissaient au bout de 3 à 6 heures de fonctionnement.

Les résultats obtenus à la Brown-Boveri ainsi que ceux du M.I.T. ont été repris par M. Warren, dont on a déjà parlé, qui a donné les raisons de cette formation de piqûres. Les résultats qui sont particulièrement importants pour la suite de l'exposé méritent d'être examinés.

Le galet rapide exerce sur le galet lent une force tangentielle due au frottement (Figure 4). Le galet lent dans la zone d'arrivée d'huile est en tension, le galet rapide est en compression.

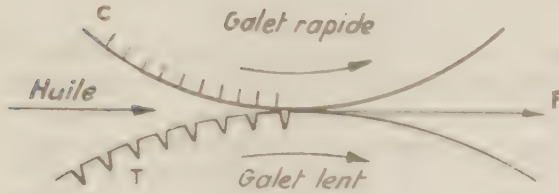


Fig. 4

De l'autre côté du point de contact, on a les contraintes en sens inverse. La partie tendue du galet lent aura des craquelures; si l'effort est trop grand l'huile pénétrera dedans puis, la dent passant dans la zone de contact, il régnera une forte pression hydrostatique dans ces craquelures qui s'élargiront, d'où détérioration rapide de la pièce. C'est à ce phénomène que seraient dues les piqûres observées à la Brown-Boveri et au M.I.T.

4 - PROCÉDÉ WALKER -

Ce procédé est une généralisation des deux systèmes précédents à des engrenages hélicoïdaux. Nous savons que, dans ce genre de pignons le contact se fait suivant des segments rectilignes inclinés. En chaque point de contact, les vitesses de roulement et de glissement sont différentes. Il est facile de voir qu'en prenant deux galets coniques en contact le long d'une génératrice, on arrive à réaliser des conditions de contact identiques à celles des pignons. C'est ce système qu'a employé M. WALKER; il a réalisé les galets de la figure 5. Cet appareil permet de vérifier que les piqûres se forment uniquement sur les zones correspondant aux creux où le glissement et le roulement sont de sens opposés.

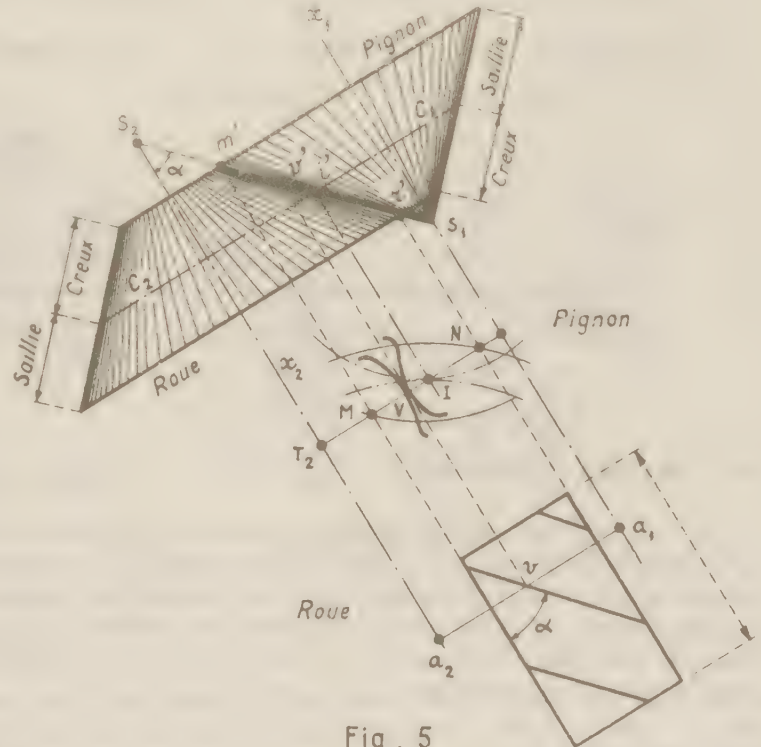


Fig. 5

5 - DIVERSES METHODES DE MESURE DE L'USURE -

Les appareils décrits ci-dessus ont tous pour but de mettre les surfaces frottantes en contact et de réaliser des conditions cinématiques et dynamiques déterminées à l'avance. Il reste maintenant à

voir quelles sont les différentes méthodes de détermination de l'usure des éprouvettes après que celles-ci ont subi un certain temps de fonctionnement sur les machines.

a - Pesée

Le procédé le plus simple, au premier abord, est celui de la pesée des éprouvettes avant et après l'essai; il présente cependant les inconvénients suivants :

- Dans le cas de pièces métalliques, il peut parfois se produire des arrachements brusques en cours d'usure; cela donne des variations brusques de poids qui ne correspondent pas à une usure réelle.
- Dans le cas de corps comme les plastiques qui absorbent le lubrifiant dans lequel ils travaillent, on assiste au début des essais à des augmentations de poids au lieu d'avoir des diminutions; cela se traduit par des usures négatives. La mesure ne signifie plus rien. La figure 6 montre une courbe d'usure en poids d'un galet en plastique stratifié; ce phénomène est net.

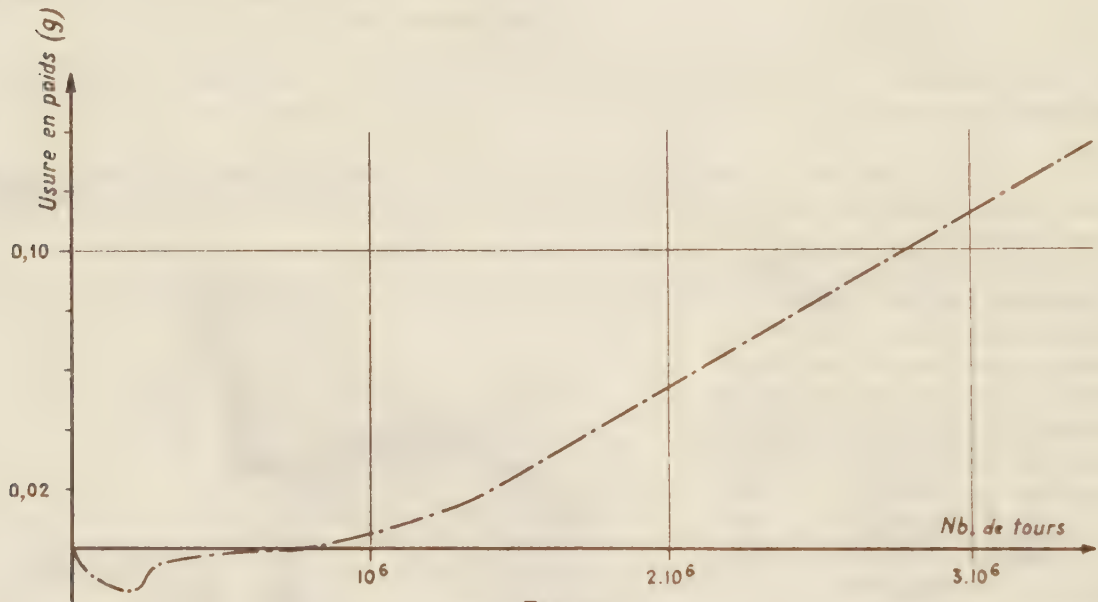


Fig. 6

b - Mesures linéaires

Ce procédé consiste à prendre les cotes de la pièce avant et après l'usure et d'en déduire la perte de dimensions des pièces. Il a été appliqué par Opitz et Hesse pour les engrenages. Il peut être appliqué à des galets en prenant les cotes de plusieurs diamètres repérés avant et après usure. Sa précision dépend de la précision de la machine à mesurer. Dans le cas des plastiques il n'est valable que si ceux-ci ne gonflent pas après imprégnation dans l'huile de graissage.

c - Marquage :

Cette méthode a été appliquée dans certains cas particuliers (S.Mckee, Journal of Research, Août 1947). Elle consiste à faire sur la surface à user une empreinte en forme de

pyramide très évasée (figure 7). En s'usant, cette empreinte diminue de taille; la différence des dimensions permet de calculer la perte de hauteur de la pièce. C'est une méthode assez sensible mais elle s'applique difficilement aux surfaces courbes.



Fig. 7

Il existe finalement une nouvelle méthode en usage depuis quelques années : c'est l'utilisation des traceurs radioactifs pour détecter l'usure. Nous en reparlerons plus loin.

6 - UTILISATION DE LA MACHINE D'USURE "AMSLER"

La méthode qui a été employée dans nos essais d'usure d'engrenages en matières plastiques a été celle préconisée par le M.I.T. Elle est la plus générale et celle qui simplifie le plus les données du problème. Des galets de diamètre déterminé, roulant avec ou sans glissement, permettent d'étudier l'usure des engrenages qu'ils représentent. La machine utilisée pour donner le mouvement et les forces est la machine d'usure "Amsler".

a - Objet de la machine

Cette machine a été conçue pour étudier l'usure des métaux par roulement, glissement, ou la combinaison des deux. Elle a été surtout destinée à étudier les usures de rails et des bandages de chemin de fer (Figure 8).

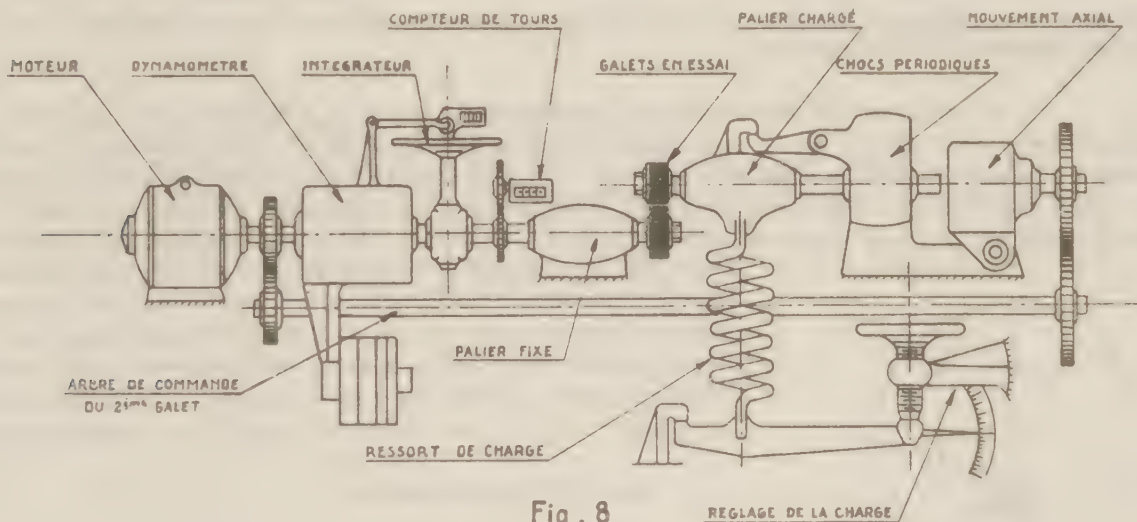


Fig. 8

b - Principe de fonctionnement

Les matériaux à essayer sont sous forme de galets de 30 à 50 mm. Ils sont montés en porte-à-faux sur deux arbres parallèles. Le nombre de tours des deux arbres diffère de 10%. On peut choisir alors le rapport des diamètres des galets pour qu'ils roulent l'un sur l'autre sans glisser. La figure 9 donne une idée de l'ensemble.

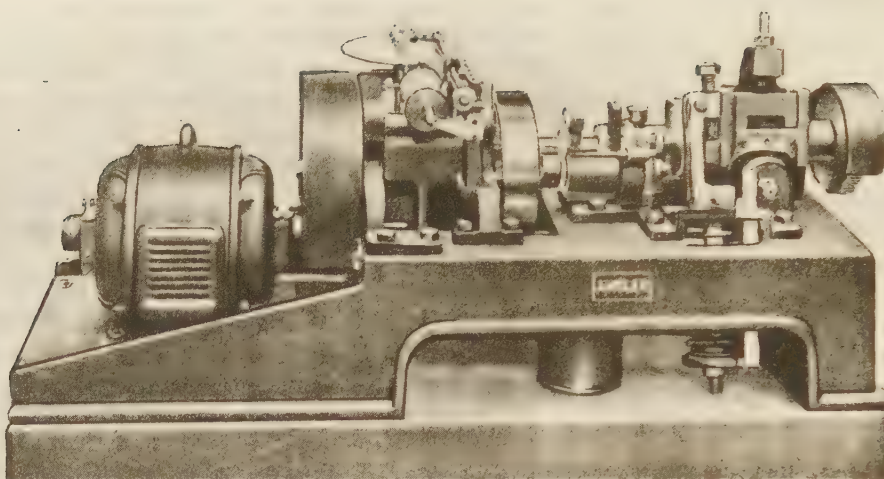


Fig. 9

c - Dispositif de mesure

L'arbre portant le galet inférieur tourne à vitesse constante, entraîné par un moteur; il porte un compteur indiquant le nombre de tours du galet. Entre l'arbre de commande et le moteur est intercalé un couple mètre donnant, sur une échelle graduée, le couple de frottement des deux disques. Un mécanisme intégrateur permet de relever, sur un compteur, le travail mécanique absorbé par les galets.

Le couplemètre est formé d'un engrenage planétaire solide d'un pendule que le couple transmis fait dévier de la position verticale. Le sinus de l'angle de déviation du pendule donne la mesure du couple transmis sur une tige déplacée horizontalement devant une graduation. Cette tige T porte également un galet intégrateur G se déplaçant suivant le rayon d'un disque horizontal D d'une longueur proportionnelle au couple résistant (Figure 10). Le galet G est mis en rotation par le disque D dont la vitesse est proportionnelle à celle du galet usé. Il en résulte que le chemin parcouru par le galet G étant proportionnel au nombre de tours du galet et au couple de frottement, est proportionnel au travail mécanique transmis par le dynamomètre pendulaire. Il est lu, en nombre de tours, sur le compte-tours C.

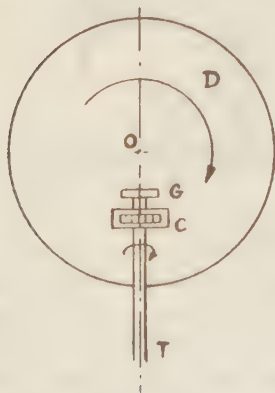


Fig. 10

d - Mode d'entraînement

La machine est commandée par un moteur de 1 CV. On l'abandonne à elle-même une fois en marche, un disjoncteur étant prévu pour parer à toute éventualité. Toutes les parties tournantes sont montées sur roulements à billes pour réduire au minimum les frottements parasites du mécanisme.

e - Lubrification -

La lubrification des galets, indispensable pour se placer dans les conditions normales de fonctionnement des engrenages, a été réalisée très simplement. Un bac à huile a été placé sous le galet inférieur (Figure 11) qui pénètre dans cette huile. L'huile entraînée par viscosité passe entre les deux galets.

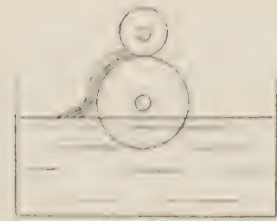


Fig. 11

f - Méthode de mesure de l'usure -

Pour étudier l'usure, on a pris des galets en matière plastique qui ont été repérés sur 3 diamètres à 120° (Figure 12). Des mesures de diamètre ont été faites au comparateur optique à l'aide de cales Johnson, ce qui nous a donné une précision de $\pm 2,5$ microns, largement suffisante pour les états de surface étudiés. Ces galets ont été placés sur la machine, sous des charges déterminées, puis usés pendant des temps variant entre 6 heures et 24 heures. Retirés ensuite, ils étaient de nouveau mesurés. La moyenne des différences de diamètres nous donnait une valeur de l'usure de l'éprouvette. Le même galet était remis dans la machine pour un second essai, et ainsi de suite jusqu'à la détérioration totale. Les différentes valeurs de l'usure, en fonction du nombre de tours de la machine, nous permettent de tracer une courbe d'usure pour une charge déterminée.



Fig. 12

g - Raisons de l'utilisation de cette machine -

Cette machine a été utilisée, de préférence à tout autre dispositif, pour plusieurs raisons

- Elle est simple, a peu de frottements internes,
- Elle possède des appareils de mesure du frottement et du travail,
- Elle permet de réaliser toute la gamme d'essais qui ont été faits par d'autres expérimentateurs à l'aide de dispositifs de fortune,
- Elle peut fonctionner, abandonnée à elle-même, toute la nuit sans surveillance, ce qui permet de gagner du temps dans les essais.

- CHAPITRE II -

ETUDE DE LA DISPERSION DES RESULTATS D'ESSAIS

1 - NECESSITE DE CETTE ETUDE

Il est absolument indispensable, avant de commencer les essais à l'aide de la machine Amsler, de se rendre compte de la fidélité de cette machine, de voir si les phénomènes qu'on y observe sont reproductibles. Cela nous donnera une indication sur le degré de confiance qu'on pourra accorder aux chiffres obtenus ainsi que sur la précision de ces résultats. Cette étude préalable s'impose dans tous les essais sur des phénomènes complexes du genre de l'usure qui sont la résultante d'une série de faits élémentaires qui nous échappent dans le détail.

2 - ESSAIS DE DISPERSION

a - Essai sur une matière homogène : l'acier -

Il est indispensable, au début, d'étudier l'usure sur un matériau homogène tel que l'acier, de façon à éliminer le facteur dispersif dû à l'hétérogénéité de la matière. La dispersion trouvée est alors celle de la machine.

Dans ce but, on a fabriqué une série de 5 paires de galets en acier, les paires étaient absolument identiques entre elles, tournées dans la même barre d'acier doux. Les diamètres de ces galets étaient de 36 mm et 55mm, l'épaisseur 10 mm. A chaque essai, un petit galet a été monté sur l'axe supérieur de la machine Amsler; le grand galet, sur l'axe inférieur, à plus grande vitesse de rotation de façon à réaliser le maximum de glissement. En outre, le galet inférieur baignait dans l'huile de graissage contenue dans un bac. Ces galets étaient repérés, au préalable, sur 3 diamètres à 120°.

Une paire de galets fonctionnait pendant 24 heures consécutives ce qui donnait un total de 300 000 tours; elle était ensuite enlevée et remplacée par une autre paire. Chaque paire de galets a été ainsi mise 3 fois sur la machine, ce qui représentait 900 000 tours au total. Naturellement, après chaque arrêt, la mesure des diamètres était faite au comparateur optique. La charge appliquée sur les galets était de 10 kg par mm.

On a ainsi obtenu 5 courbes ascendantes (*figure 13*) . En définissant la dispersion à l'extrémité des courbes comme le rapport en pour cent entre les ordonnées extrêmes et l'ordonnée moyenne, on obtient une dispersion de 15%.

Une étude de la dispersion en poids a été faite également, à titre indicatif, par deux pesées sur chaque éprouvette, au bout de 300 000 et 600 000 tours. Les courbes obtenues (*Figure 14*) dénotent une dispersion de 28% nettement supérieure à l'autre. Elle s'explique par l'examen des galets après usure : des arrachements de particules de la surface modifient sensiblement le poids.

Une étude de la dispersion sur les travaux de frottement indiqués par la machine a été faite également. La dispersion a été très faible, de l'ordre de 5% (*Figure 15*). Le couple de

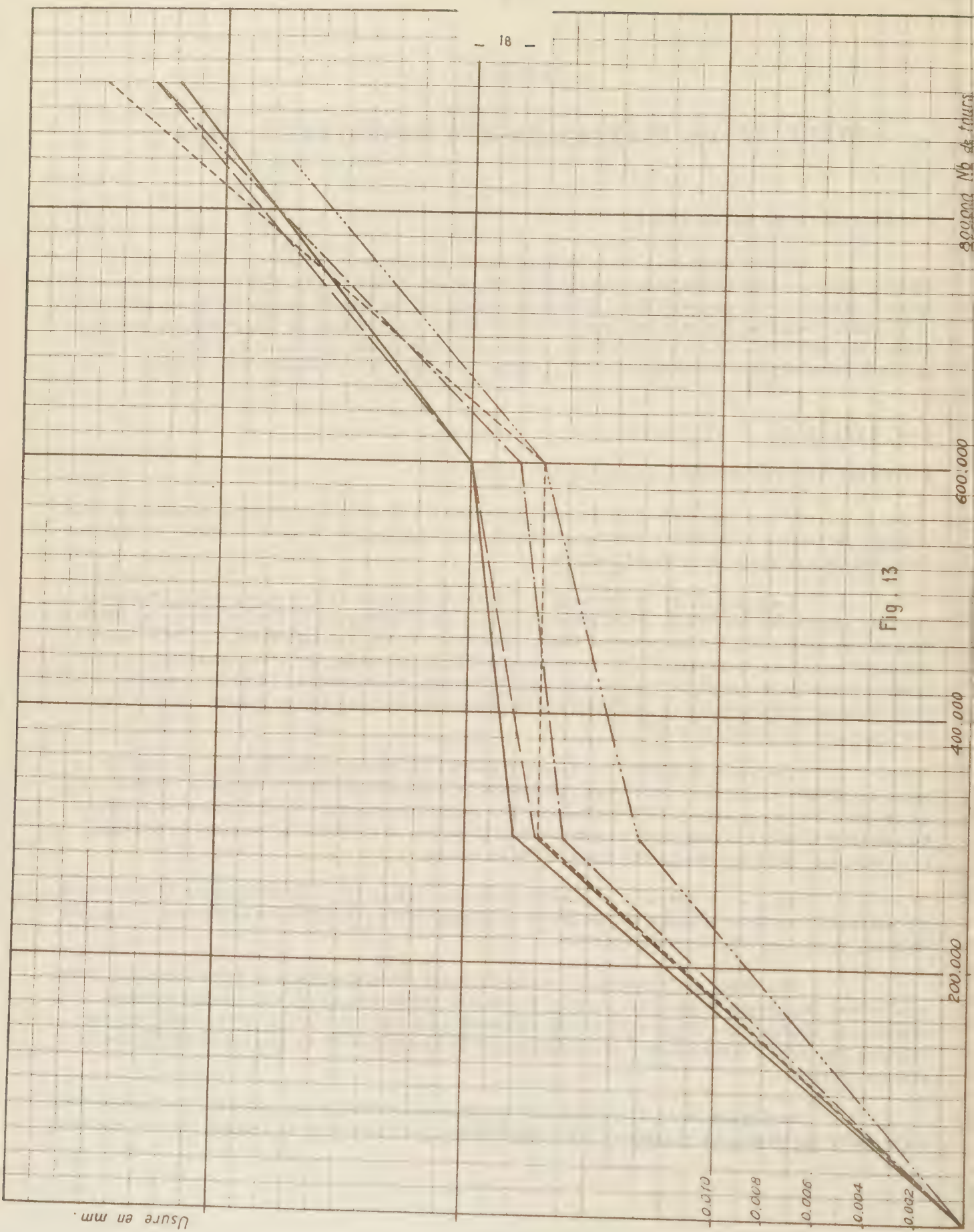


Fig. 14

- 19 -

0.10

0.05

0.01

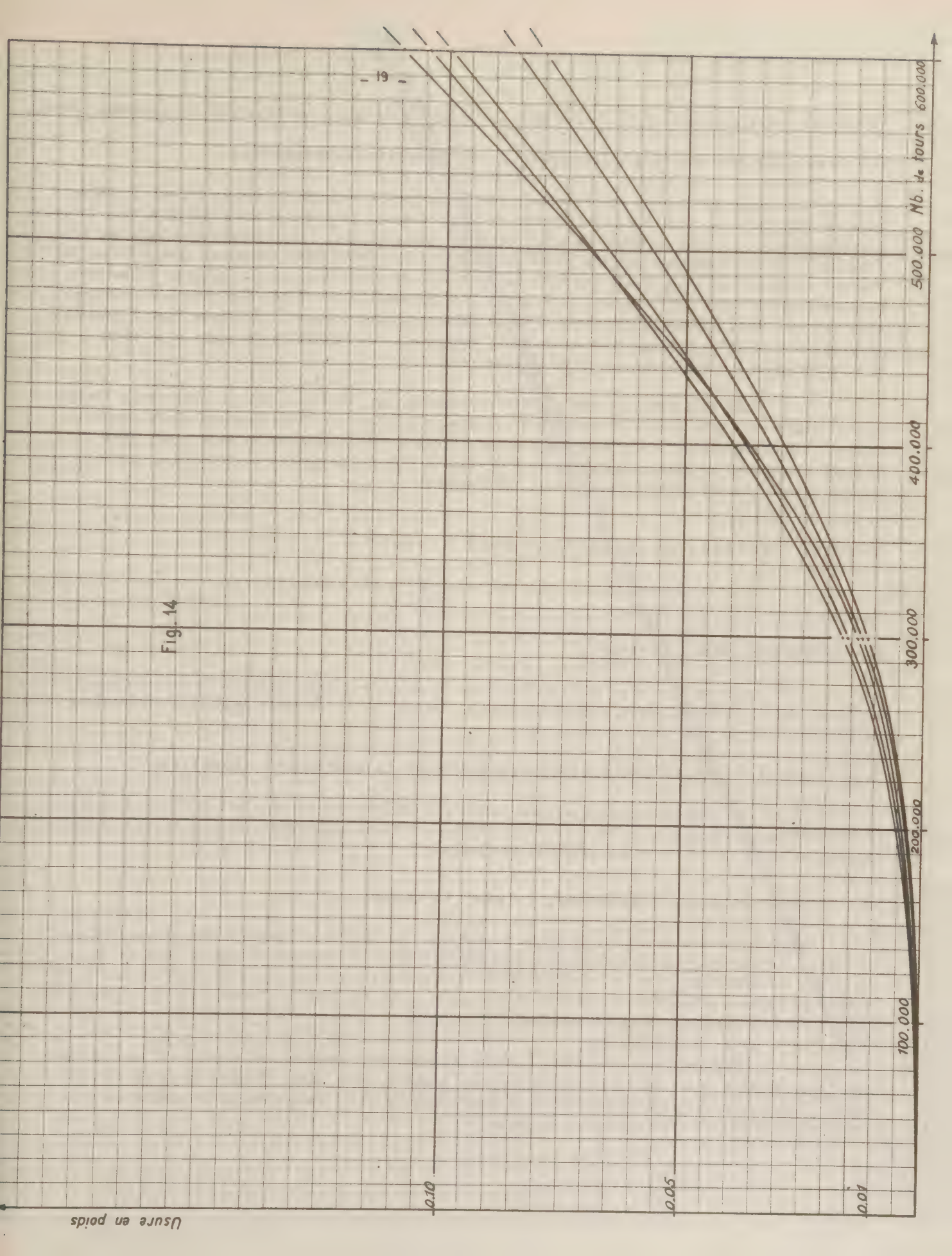
100.000

200.000

300.000

400.000

500.000 Nb. de tours 600.000



frottement ayant été partout le même ainsi que le nombre de tours, ce résultat est compréhensible.

b - Essai sur une matière hétérogène : les plastiques stratifiés

Des essais ont été effectués par la suite à l'aide de galets en phénol formaldéhyde, à base de tissu de coton. Les couches de tissu étaient dans des plans parallèles aux faces du galet, ainsi que cela se passe dans les dentures d'engrenages. Les 5 galets en plastique étudiés fonctionnaient appuyés par une force de 5 kg/mm sur un même galet en acier fixé à l'axe inférieur. Ce galet en acier avait été rodé au préalable de façon à présenter un état de surface convenable de l'ordre de 2 microns. Ceci était indispensable pour ne pas avoir de perturbations dans les résultats par suite d'un rodage de ce galet en cours d'essai. Le couple "galet supérieur en plastique et galet inférieur en acier doux" représente les conditions d'usure d'un pignon d'acier engrénant sur une roue en matière plastique.

Les résultats obtenus ont été représentés sur la figure 16. La dispersion finale est de l'ordre de 17%. Elle est légèrement supérieure à celle sur l'acier et cela est compréhensible. La dispersion sur le travail de frottement reste identique à ce qu'elle était dans l'essai précédent. La dispersion en poids n'a pas été faite, les galets en plastique absorbant le lubrifiant, ce qui fausse complètement les mesures.

3 - LES FACTEURS DISPERSITIFS DANS L'USURE -

La dispersion obtenue dans ces résultats a des causes multiples que nous pourrions classer ainsi :

a - Dispersion due à l'essai

La mise en charge de la machine par la compression du ressort, le serrage des galets sur leur axe, ne sont pas identiques d'un essai à l'autre; ceci également amène des différences dans les mesures.

b - Dispersion due au comparateur optique pour la mesure des diamètres.

Le comparateur optique nous donne ses mesures qui ne sont pas toujours identiques à elles-mêmes, la pression qu'il exerce sur l'éprouvette pouvant varier, le jeu des vis micrométriques étant également d'une certaine influence.

c - Dispersion due à l'opérateur faisant la mesure -

L'opérateur travaillant au comparateur est également sujet à des erreurs de parallaxe ou d'appréciation des divisions. Une même pièce a été mesurée plusieurs fois de suite au comparateur optique, par le même opérateur travaillant dans les mêmes conditions. Les différences de lecture ont été de l'ordre de 5 microns qui est le maximum d'erreur due à la somme des dispersions du comparateur et de celui qui le manipule.

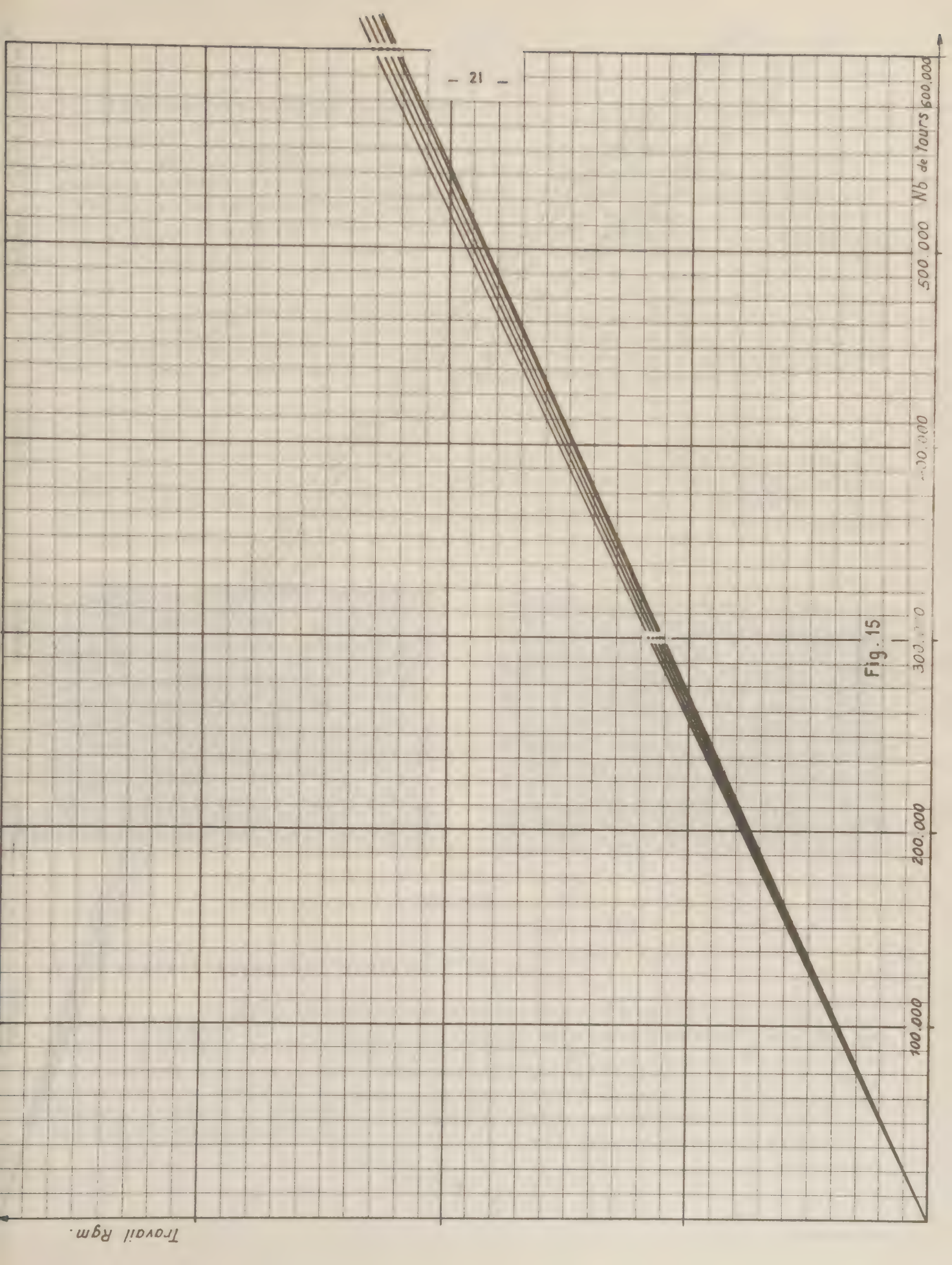
Une remarque importante à faire au sujet de la mesure des usures est que celle-ci est la différence entre deux mesures de longueur : celle faite avant l'usure et celle faite après l'usure. Les erreurs de lecture sont donc doublées et il faudra en tenir compte dans la détermination de la précision d'un résultat.

Travail Rgm.

- 21 -

Fig. 15

100.000 200.000 300.000 400.000 500.000 Nb de jours 600.000



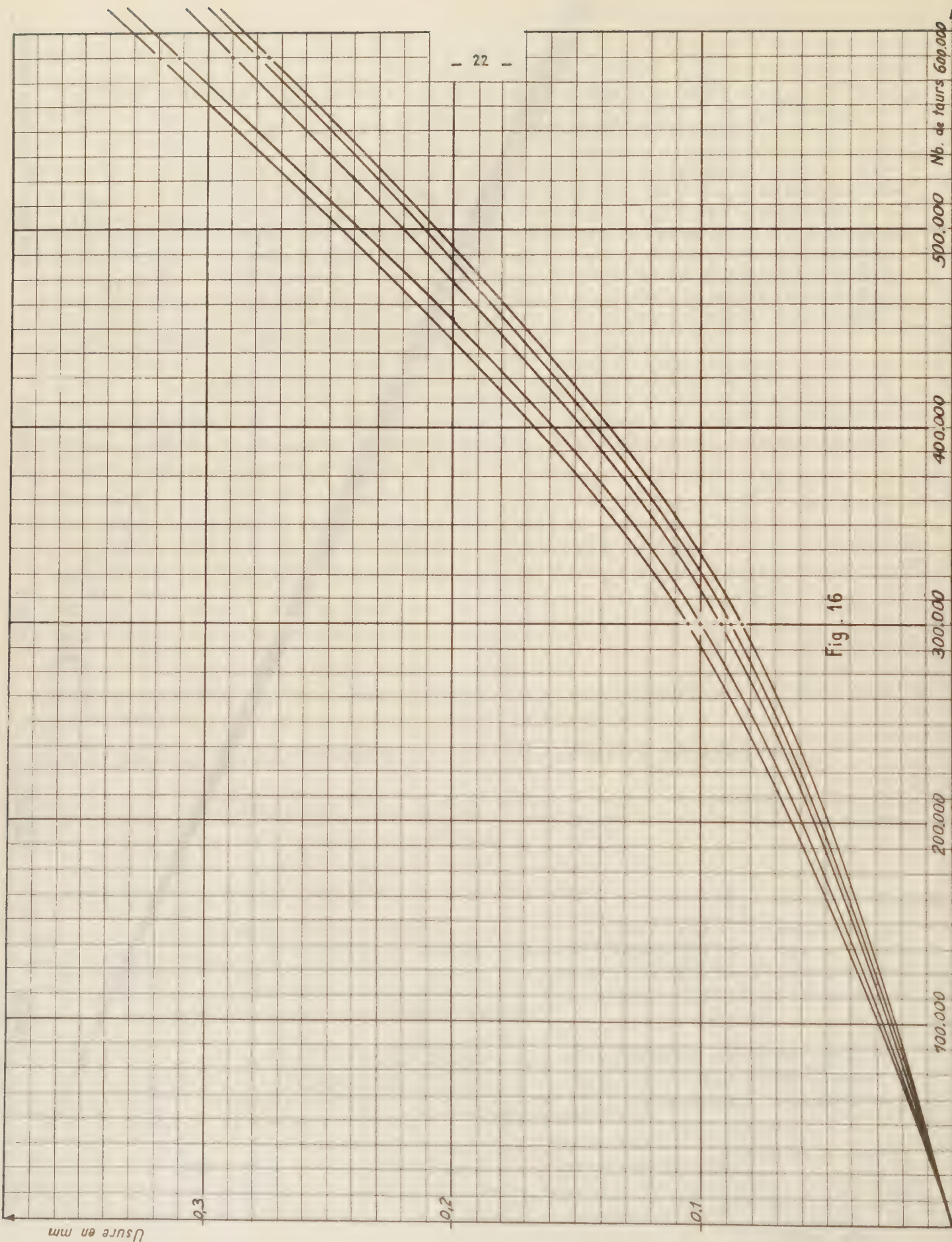


Fig. 16

d - Dispersion due à l'état de surface

L'état de surface des pièces mesurées est susceptible de fausser la mesure. Il n'est, en effet, pas possible d'obtenir une précision de l'ordre du micron sur des surfaces ayant des aspérités de la même grandeur. En général, dans les essais effectués sur plastique, l'état de surface est de l'ordre de 5 microns qui est l'ordre de grandeur de la définition géométrique de la surface du galet; il faut donc employer un instrument de mesure donnant cette précision. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle un appareil plus précis, de mesures dimensionnelles, n'a pas été employé.

A cet état de surface microgéométrique, facteur dispersif dans les mesures, s'ajoute l'état de surface macrogéométrique qui a également son importance. La surface du galet se transforme souvent en petites facettes dont certaines sont visibles à l'oeil nu. Il est évident que ceci contribue à modifier les lectures faites au comparateur.

e - Dispersion due à l'hétérogénéité de la matière

La constitution de la matière joue aussi un rôle dans les différences d'usure. Les matériaux utilisés sont rarement d'une homogénéité parfaite. Les aciers utilisés pour les essais préliminaires bien que tirés d'une même barre, ont présenté des différences de structure décelées par l'analyse métallographique. Nous remarquons ceci par la comparaison des deux structures cristallines des figures 16 bis.

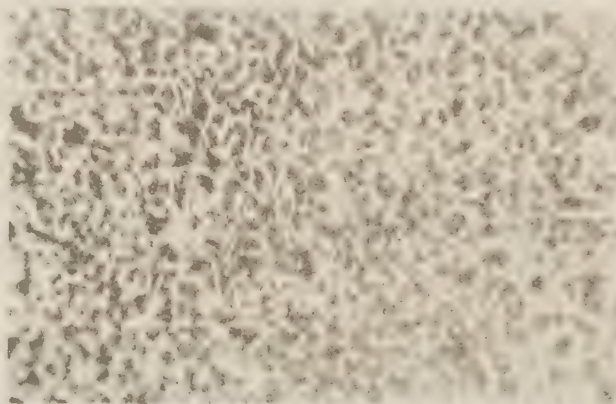
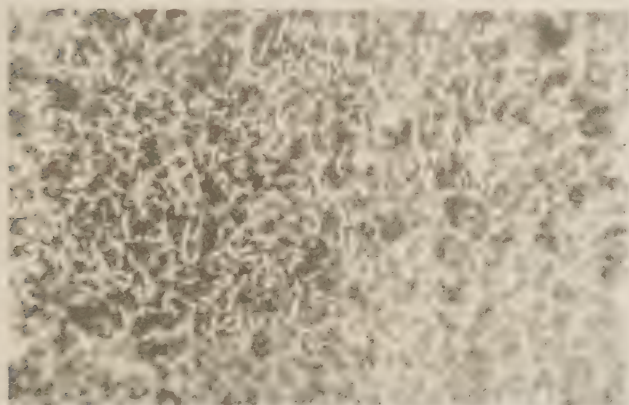


Fig. 16^{bis}

4 - INTERPRETATION DES RESULTATS D'ESSAIS -

Les fortes dispersions obtenues dans les essais d'usure sont de nature à inquiéter des personnes habituées aux résultats rigoureux des mathématiques ou à la précision de certaines expériences physiques comme en électricité par exemple. Cet état de fait assez fâcheux se rencontre pourtant très souvent en mécanique expérimentale; il est dû à la grosse différence existant entre la théorie et l'expérimentation. Cette différence provient de la complexité des phénomènes étudiés et de la multitude de causes de dispersion que nous venons d'énumérer. Nous savons que le phénomène de résistance des matériaux le plus simple, c'est-à-dire la rupture

d'un barreau dans une machine de traction, est soumis à une forte dispersion; à plus forte raison, il en est ainsi pour des phénomènes complexes comme l'usure. Des essais d'usure plus complexes que ceux entrepris sur les stratifiés, à savoir l'usure des bâtis en fonte de machines-outils, effectués à la Station d'Essais de Machines-Outils à Issy-les-Moulineaux, ont donné des dispersions beaucoup plus accusées. Elles étaient de l'ordre de 150% alors que de multiples précautions ont été prises pour s'assurer de l'identité parfaite à notre échelle, des éprouvettes d'essai.

Les expériences préliminaires entreprises doivent-elles nous conduire au scepticisme ? Ce serait, en fait, une attitude négative. La complexité des facteurs n'ayant pas empêché la résistance des matériaux d'exister comme science, les phénomènes d'usure peuvent, eux aussi, être étudiés scientifiquement. Avec la dispersion de 17% obtenue, il est toujours possible de faire la moyenne d'une série de courbes et de donner le résultat avec une pareille approximation.

Il ne faut pas oublier d'autre part une des règles de base de la résistance des matériaux qui consiste à se placer toujours dans les conditions les plus défavorables. De même dans une étude d'usure, il faudra toujours se placer dans le cas de l'usure maximum dont nous connaissons la valeur et de raisonner comme si c'était elle qui devait effectivement se produire à tous les coups.

- CHAPITRE III -

ELASTICITE DES MATERIAUX EMPLOYES

I - DIFFICULTES QUE PRESENTE CETTE ETUDE

L'étude du comportement élastique des phénoplastes stratifiés, sous l'effet de forces appliquées, est indispensable si on veut avoir une idée précise de la nature des phénomènes se passant dans une dent d'engrenage. Celle-ci est soumise à de nombreux efforts répétés pouvant déformer, plus ou moins profondément la structure de la matière dont elle est formée.

Il existe des différences profondes entre l'élasticité des matériaux plastiques tels que les phénoplastes stratifiés et celle des métaux tels que l'acier et le bronze; c'est la raison pour laquelle l'étude de l'élasticité de ces matériaux plastiques doit être faite, l'extension des principes de la résistance des matériaux métalliques ne pouvant avoir une valeur scientifique. D'autre part, on travaille sur des matériaux stratifiés et, par conséquent, anisotropes. Le sens des forces par rapport aux directions principales de la matière a une grande importance.

De nombreux travaux ont été effectués sur le comportement élastique des stratifiés à base de bakélite. Citons tout d'abord les travaux de M.R. L'HERMITE du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics. Dans la "Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des matières plastiques", publiée en Octobre 1942, il étudie l'hystérésis de différentes matières plastiques, surtout à base de toile. Il aboutit à la conclusion suivante :

"La faculté d'écroutissage est déterminée par la disparition plus ou moins rapide des déformations plastiques et les solides se distinguent entre eux par leur vitesse d'écroutissage. Certains possèdent une vitesse d'écroutissage apparemment instantanée (métaux); d'autres ne se stabilisent qu'au bout d'un grand nombre de répétitions; dans cette catégorie, nous trouvons les matières plastiques".

Dans la note technique N° 30 du "Groupement Français pour le développement des Recherches aéronautiques", MM. L'HERMITE et BAUMARTEN publient des "Recherches expérimentales sur l'élasticité, la plasticité et le frottement interne des plastiques chimiques". Ils aboutissent aux conclusions suivantes : la déformation d'un matériau plastique est composée de 3 termes :

- la déformation plastique irréversible,
- la déformation élastique instantanée,
- la déformation élastique différée.

Ils étudient beaucoup les phénomènes d'hystérésis se traduisant sur les courbes de contrainte/déformation par des boucles dont la pente moyenne est le module de déformation. Ils observent également la migration de cette boucle sous l'effet de la répétition des contraintes.

Dans la revue "Machines et Métaux" d'août 1947, nous trouvons une étude faite par M. DE FLEURY pour les Services Techniques du Ministère de l'Air. Il y étend, aux plastiques, ses méthodes de transposition des matériaux (Revue Mécanique, Mai, Juillet, Septembre 1943; Revue

Métallurgie 1943). D'après lui, ce qui importe pour un matériau ce n'est pas le module d'élasticité M et la limite élastique E , mais le rapport $\frac{E}{M}$ et M . Il en déduit une carte nomographique de tous les plastiques et s'en sert pour faire des calculs de combinaison des matériaux mixtes. Nous n'insisterons pas sur les opinions émises dans cette étude.

2 - NATURE DES MATERIAUX EMPLOYÉS

Les matières plastiques ont été toutes normalisées et à chacune d'elles correspond une désignation précise dépendant de sa composition chimique et de sa structure physique.

Les matériaux qui ont été étudiés du point de vue usure sont de 3 genres :

- a) - Phénols formaldéhydes stratifiés à base de tissu de coton à 16 fils : P 44 classe 1.
- b) - Phénols formaldéhydes stratifiés à base de tissu de coton à 26 fils : P 44 classe 2.
- c) - Phénols formaldéhydes stratifiés à base de feuilles de bois (1).

Ces trois matières plastiques sont les principales utilisées de nos jours pour la fabrication d'engrenages. C'est donc elles que nous étudierons dans les chapitres à venir.

Du point de vue essais d'élasticité, on étudiera le P 44 classe 2, qui nous permettra de connaître le comportement général des plastiques sous l'effet de charges. La comparaison des résultats des essais élastiques avec les résultats des essais d'usure nous donnera une idée sur la nature du phénomène d'usure.

Les deux autres matériaux seront étudiés ensuite, du point de vue usure uniquement leurs caractéristiques mécaniques étant semblables à celles du premier.

3- ESSAIS PRELIMINAIRES -

Les premiers essais ont porté sur les phénols formaldéhydes à base de tissu de coton, ils ont eu pour but de vérifier l'influence de l'imprégnation du plastique par l'huile de graissage, sur les propriétés mécaniques de ce matériau.

a - Essai de dureté Vickers

On a utilisé deux échantillons de plastique; l'un imprégné d'huile, l'autre sec. L'essai a été effectué sur une surface identique à celle des dentures d'engrenages. Les plans des stratifications restant perpendiculaires à cette surface. On a utilisé une bille de 1/16 de pouce, sous une charge de 100 kg. La pièce imprégnée d'huile a accusé une dureté de 38; celle non imprégnée, une dureté de 40; soit une différence de 5%. Or, les normes sur la qualité des résines stratifiées prévoient un abaissement de dureté maximum de 10% après imprégnation. On est donc bien au-dessous de la limite permise.

(1) Les matériaux normalisés qui ont été étudiés sont fabriqués par plusieurs sociétés: la Fibre Diamont, l'Alsthom, Le Bois Bakélisé etc... et sont connus sous les noms commerciaux de : Celoron, Pextolite, Permali, etc...

b - Essai de rupture à la compression -

Plusieurs éprouvettes de compression normalisées de 1 cm^2 de section et de 2 cm de hauteur ont été utilisées. Elles ont été placées dans une machine de traction/compression et soumises à des efforts rapides, elles ont cassé pour une force de 1700 à 1750 kg, soit 17 kg/mm^2 qui peut être considérée comme la charge de rupture de ces éprouvettes. L'éprouvette rompue présente divers aspects (Figures 17 et 18). La rupture ne peut pas être franche comme dans le cas de matériaux agglomérés du genre béton, à cause de la présence du tissu qui retient les parties de paké-lite.

c - Essai de rupture à la traction

Un essai de rupture a été fait à partir d'une éprouvette de traction ordinaire de section 1 cm^2 , elle a été rompue pour 415 kg soit $4,15 \text{ kg/mm}^2$ comme charge de rupture. Il fallait s'attendre à obtenir un chiffre aussi faible par rapport à la charge de rupture à la compression. Ces matériaux stratifiés ne sont pas faits pour résister à des tractions élevées. L'éprouvette a été rompue franchement en suivant un plan perpendiculaire à son axe, c'est-à-dire perpendiculaire aux plans du tissu.

d - Tracé de la courbe de compression simple

Quatre courbes de compression ont été tracées deux à l'aide d'éprouvettes imprégnées d'huile, par immersion dans un bain d'huile de graissage, pendant quinze jours. Deux autres courbes ont été obtenues à l'aide d'éprouvettes sèches. Les points ont été relevés tous les 50 kg et on a mesuré les déformations à l'aide d'un comparateur au centième. On a obtenu 4 courbes très proches les unes des autres, ce qui confirme bien que l'imprégnation d'huile n'a pas d'influence sur les propriétés élastiques ou plastiques (Figure 19). La courbe est rectiligne, puis s'incurve de plus en plus sans qu'il soit possible de définir une limite élastique quelconque.

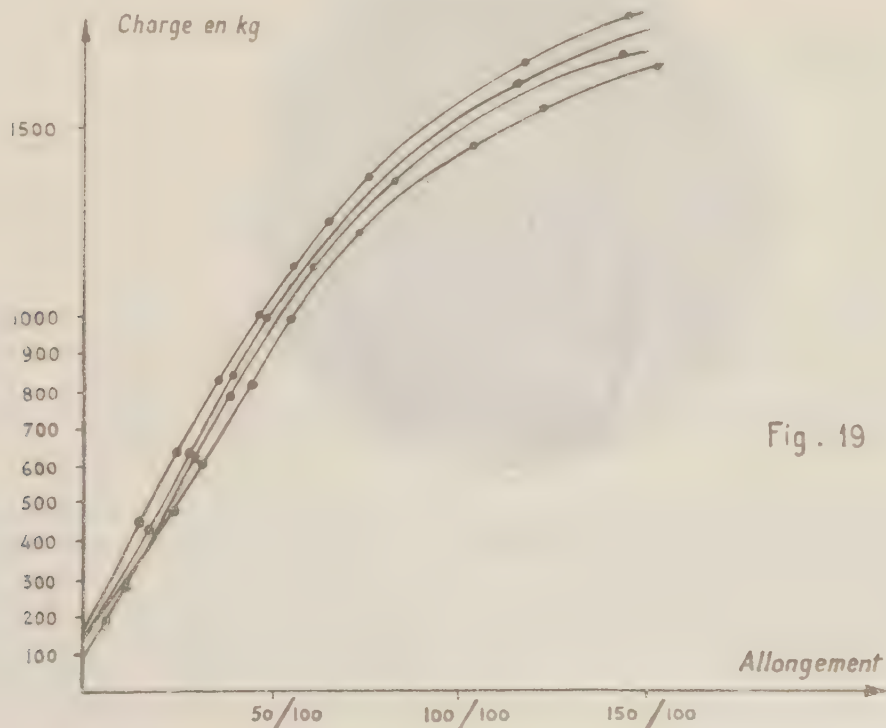


Fig. 19

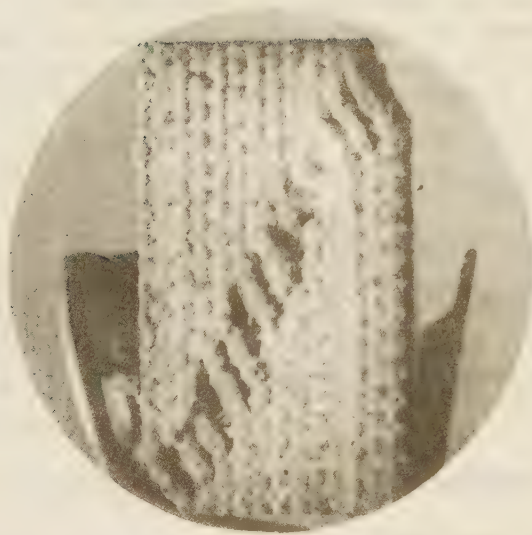


Fig . 17



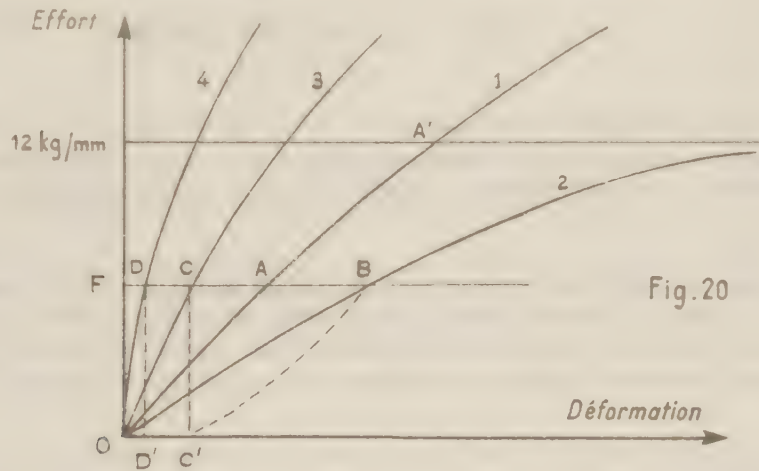
Fig . 18

4 - ELASTICITE STATIQUE -

Dans toutes ces études sur la mécanique des matières plastiques, la notion de temps d'application de l'effort est d'une importance primordiale. Les phénomènes de fluage et de réactivité sont très nombreux et suivant que les essais sont lents ou rapides, la nature des courbes obtenues se modifie profondément. C'est la raison pour laquelle il nous a paru indispensable d'étudier deux aspects de la question : l'élasticité statique et l'élasticité dynamique.

a - Premier cas : Charge appliquée pendant un temps très long:

De nombreux essais ont été effectués sur des éprouvettes de compression. On y a appliqué, dans tous les cas, une charge instantanée et on l'a maintenue très longtemps; on l'a retirée ensuite. On a observé les variations de dimensions de l'éprouvette dans le temps, qui ont donné les résultats suivants (Figure 20) avec, en abscisse les déformations et en ordonnées les efforts maxima appliqués.



Soit F la force que l'on applique instantanément. L'éprouvette subit une déformation F A et le point significatif arrive en A, placé sur une courbe 1 dite courbe de déformation instantanée.

En maintenant la force F indéfiniment, le point A se déplace jusqu'en B sous l'influence de l'écrasement progressif; B est sur la courbe 2 dite de déformation lente.

En retirant la force F, le point B va en C'. L'abscisse de C' portée sur FB nous donne le point C sur la courbe 3 dite "courbe de déformation résiduelle instantanée".

Au bout d'un certain temps de repos, C se déplace lentement jusqu'en D (il faut parfois plusieurs mois pour atteindre la stabilisation) sur la courbe 4 dite "de déformation résiduelle permanente" (c'est en réalité le point D' que l'on a mais on le représente en D). La courbe 2 de déformation lente a une asymptote horizontale pour la valeur $12 \pm 1/2 \text{ kg/mm}^2$. En appliquant cette charge à une éprouvette, on obtient le point A' sur la courbe 1 suivi d'écrasement lent de l'éprouvette et de rupture.

b - Deuxième cas : Retour instantané à la charge nulle :

Dans cette deuxième série d'essais, on a appliqué à l'éprouvette une charge instantanée et on l'a abandonnée à elle-même en mesurant les variations de ses dimensions. On a observé ainsi 4 cas différents représentés sur la figure 21.

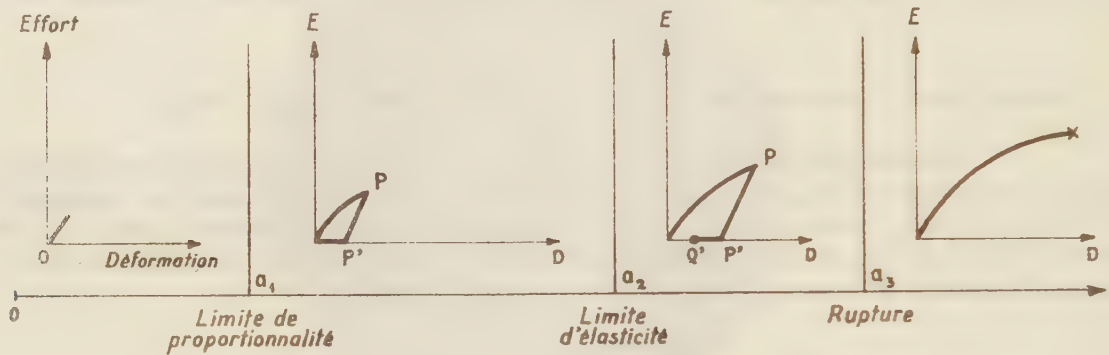
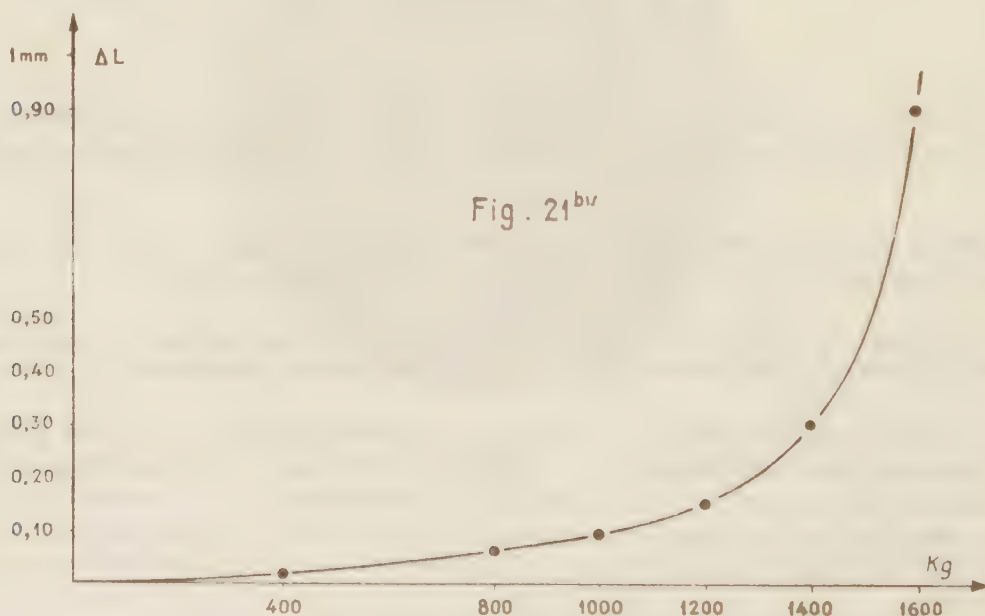


Fig. 21 - Elasticité statique

Pour des charges appliquées très faibles, le point représentatif de l'état de l'éprouvette décrit une portion de droite et retourne à l'origine donc, entre 0 et a_1 il y a proportionnalité entre l'effort et la déformation (a_1 est la limite de proportionnalité; il vaut environ 3 kg/mm^2).

Pour des charges un peu plus fortes, le point représentatif se déplace en P puis revient à P'; l'éprouvette laissée un certain temps à elle-même retourne à l'état 0. Entre a_1 et a_2 on a donc hystérésis de la matière, dégagement de chaleur mais retour à l'état initial; a_2 peut être considéré comme la limite élastique du corps; il vaut environ 5 kg/mm^2 .



Pour des charges plus fortes, le point représentatif passe en P' et de là, en Q' ; l'éprouvette abandonnée ne retourne plus à l'état initial mais en R . On obtient une zone de a_2 en a_1 dite "zone de déformation permanente"; a_3 est la charge de rupture de 17 kg/mm^2 .

Au-delà de a_2 et jusqu'à l'infini, toutes les charges appliquées amènent une rupture immédiate de l'éprouvette. La figure 21 bis nous donne une valeur de la déformation permanente en fonction de la charge.

5 - ELASTICITE DYNAMIQUE -

Nous passons au phénomène d'élasticité dynamique par la répétition rapide de l'essai précédent. Les essais ont été effectués d'abord à la machine de compression pour avoir le tracé des courbes, par la suite à l'aide d'un pulsateur rapide pour avoir des chiffres précis. On a obtenu 5 zones distinctes (Figure 22)

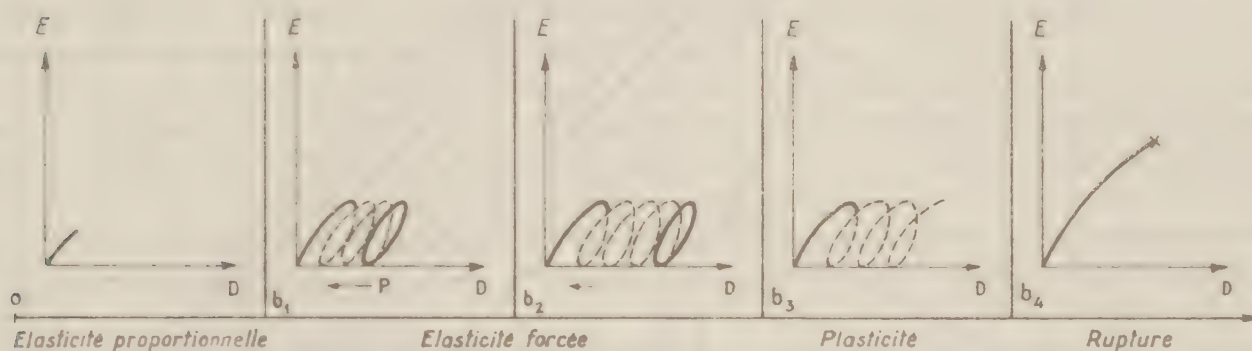


Fig. 22 - Elasticité dynamique

Pour des charges appliquées très faibles, le point représentatif décrit une portion de droite très petite sans arrêt en retournant à l'origine. On obtient la zone $0 b_1$ dite "zone d'élasticité simple ou proportionnelle"; b_1 est la limite d'élasticité proportionnelle; le cycle d'hystérésis est plat; b_1 vaut environ 1 kg/mm^2 .

Pour des charges un peu plus fortes, on obtient un cycle d'hystérésis qui se déplace vers la droite et se stabilise au bout de quelques périodes. En remettant la pièce au repos, elle retourne lentement à ses conditions initiales. On a donc une zone de stabilisation de cycle et de réactivité nulle; b_2 est la limite de réactivité nulle; il vaut $1,5 \text{ kg}$ environ.

Pour des charges supérieures, on a toujours stabilisation du cycle d'hystérésis mais l'éprouvette étant remise au repos ne retourne pas à sa position initiale; elle s'arrête en P . On a donc une zone de déformation permanente se terminant en b_3 .

La région $b_1 b_3$ est la zone d'élasticité forcée ou pseudo-élasticité; b_3 est la limite d'élasticité forcée; elle vaut entre 3 et 4 kg , sa valeur précise sera déterminée dans un essai ultérieur.

Pour des efforts supérieurs, le cycle d'hystérésis ne se stabilise plus et il y a rupture de l'éprouvette après un nombre de cycles pouvant aller à plusieurs millions. On a une zone $b_3 b_4$ ou zone de plasticité, b_4 est la charge de rupture valant 17 kg/mm^2 .

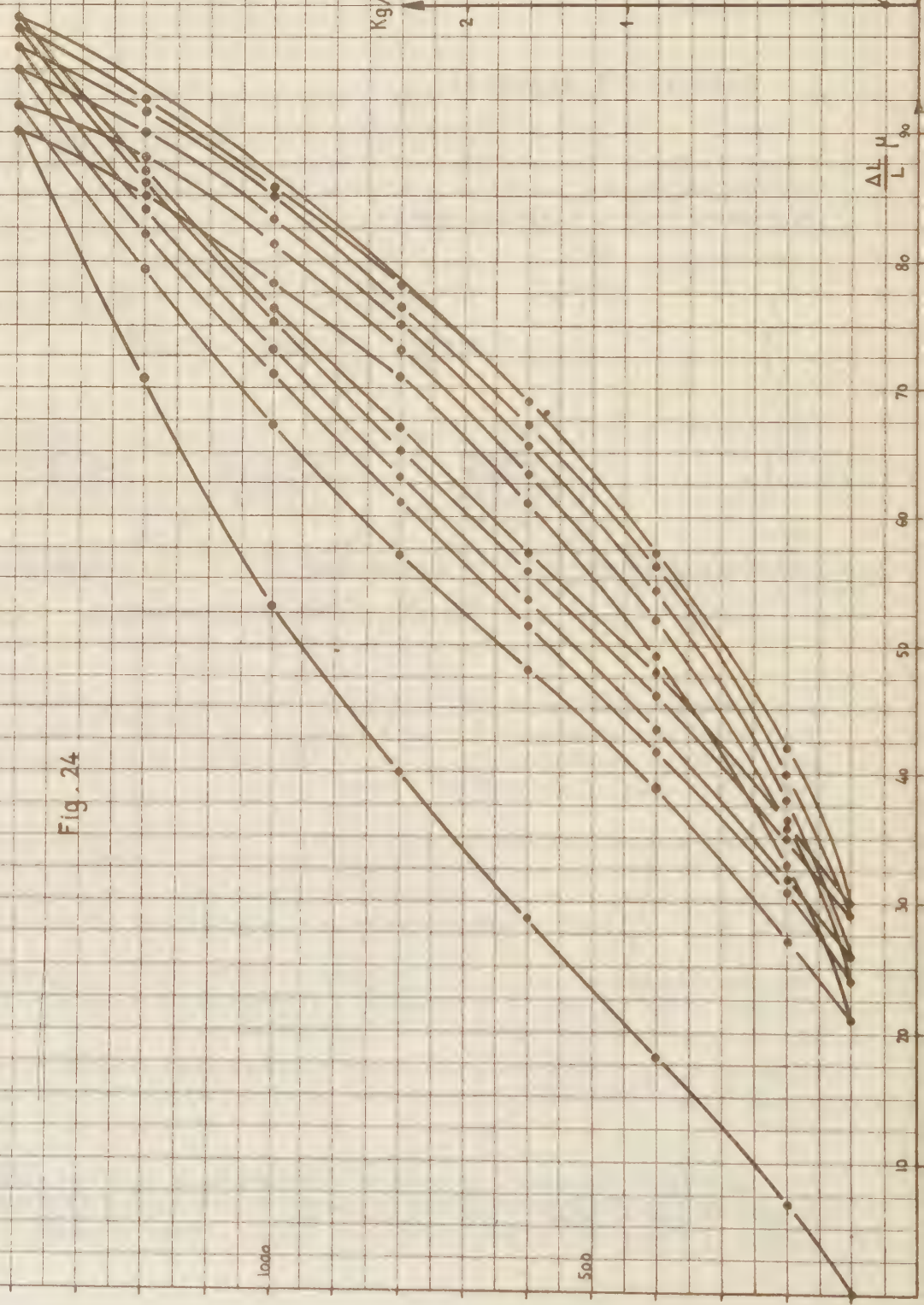
Kg

1500

1000

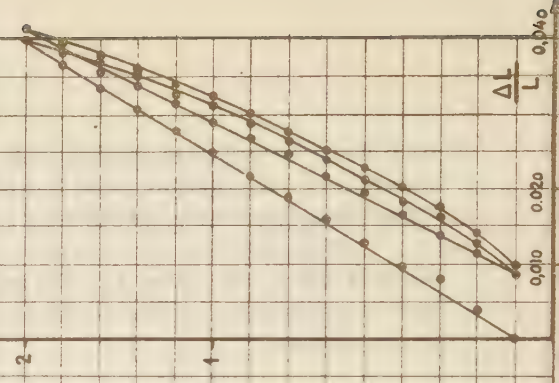
500

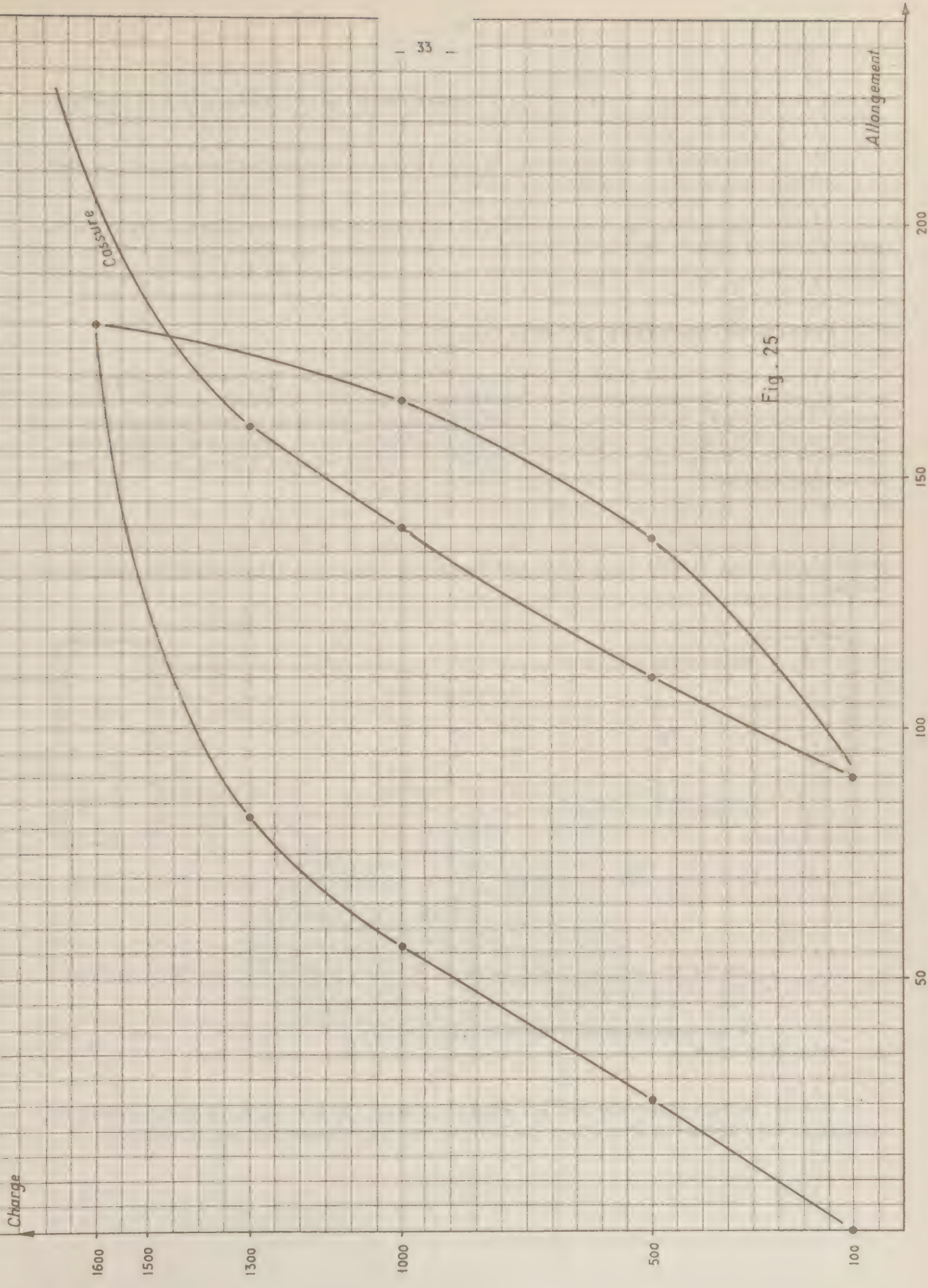
Fig. 24



Kg/mm²

Fig. 23





Dans la zone allant de b_{11} à l'infini, il y a rupture immédiate de l'éprouvette à la première compression; c'est la zone de rupture.

La figure 23 nous montre la courbe obtenue avec stabilisation de cycle au bout de 8 périodes pour un effort maximum de 2 kg/mm^2 .

Les figures 24 et 25 nous montrent les cas de plasticité avec des efforts allant jusqu'à 14 et 16 kg/mm^2 . Pour 14 kg, on a une succession de cycles allant jusqu'à l'infini; pour 16 kg, la cassure se produit après le premier cycle car on est proche de la charge de rupture.

6 - ESSAIS DE COMPRESSION REPETEE

Dans l'essai dynamique précédent, le point qui nous intéresse le plus est le point b_3 , limite d'élasticité forcée. En effet, dans toute pièce mécanique en matière plastique soumise à des efforts périodiques, il indique la limite des contraintes au-delà desquelles on a une détérioration rapide. Il est donc important de connaître cette valeur avec plus de précision. On a utilisé pour ceci un pulsateur Schenck qui est un appareil d'essai de métaux sous contraintes répétées.

On a utilisé le montage suivant : deux demi-éprouvettes en acier étaient maintenues dans les mâchoires de la machine (figure 26). On plaçait entre elles une éprouvette cylindrique en plastique stratifié qui était centrée par deux logements creusés dans les deux éprouvettes.

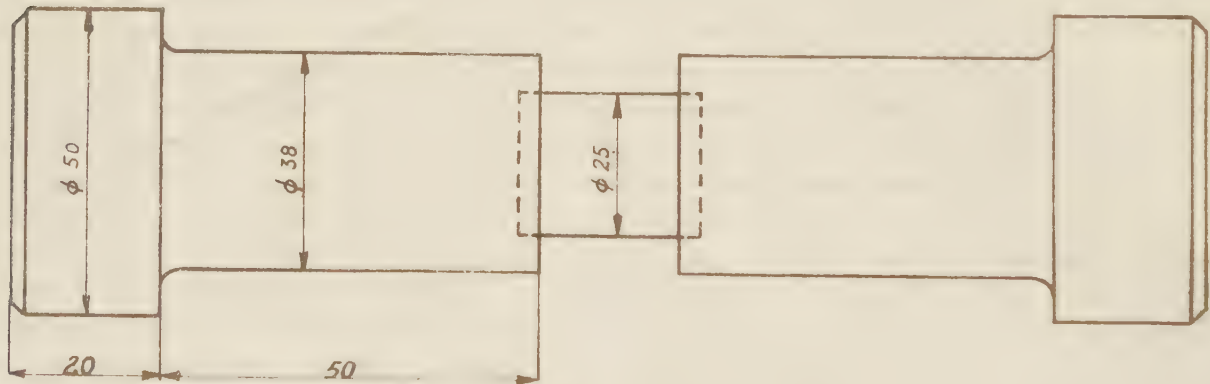


Fig. 26

Les charges appliquées ont varié entre 2 et 4 kg/mm^2 , les résultats sont consignés dans le tableau suivant (page 37).

Ce qui nous donne le diagramme logarithmique de la figure 27. La valeur b_3 cherchée est de $3,76 \text{ kg/mm}^2$.

Il faut noter que dans ces essais également, on n'a pas eu de cassure nette des éprouvettes mais des déformations; ces cas ont été considérés comme des cas de rupture.

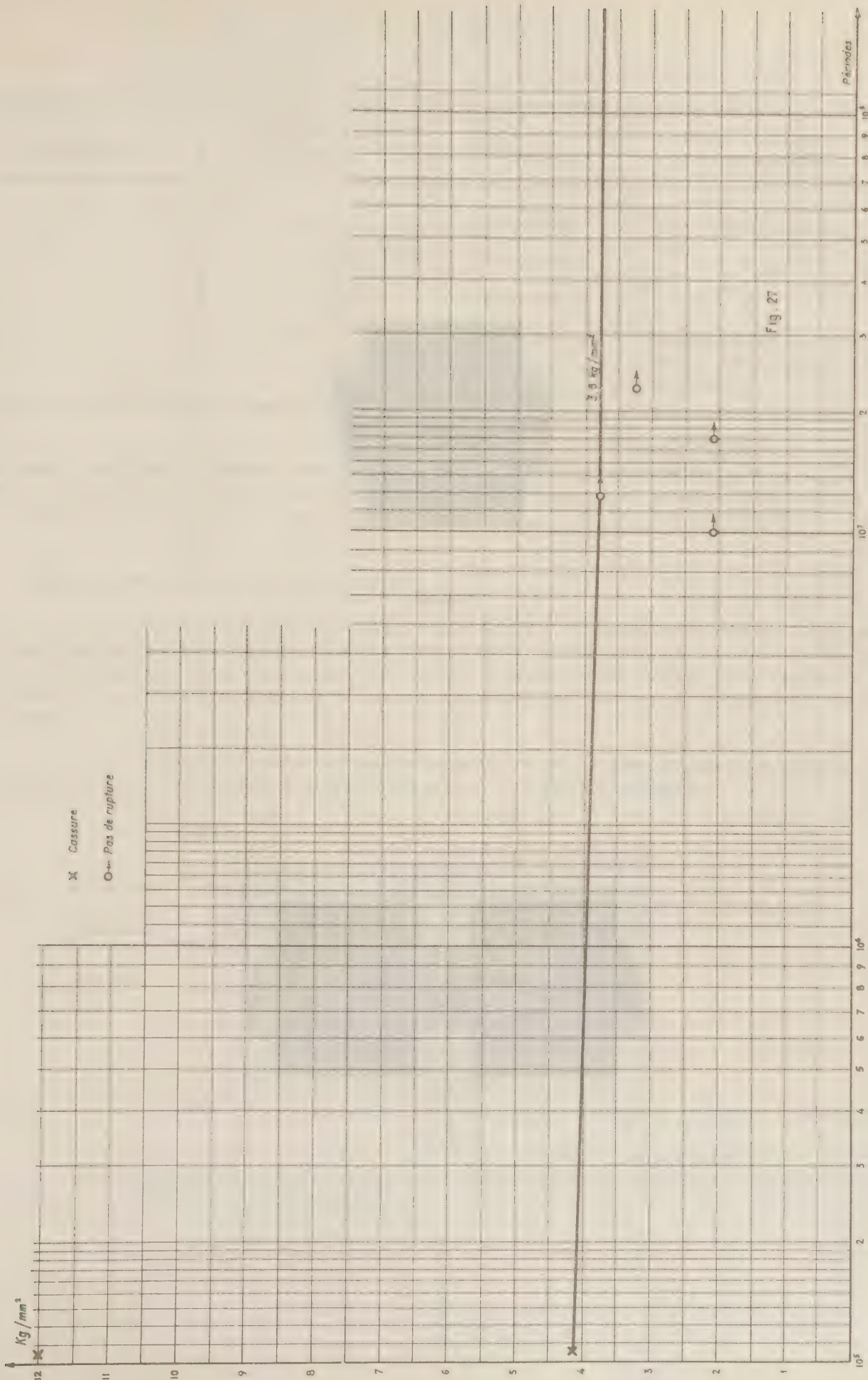


Fig. 27

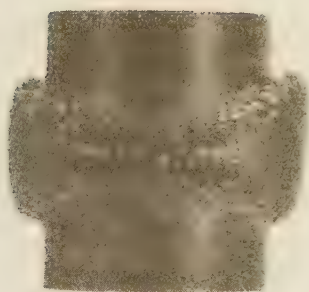


Fig. 28

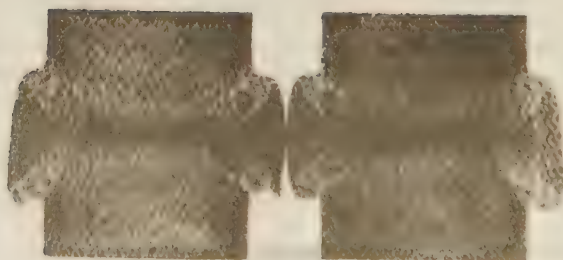


Fig. 29

N° de l'ÉPROUVETTE	CONTRAINTE kg/mm ²	NOMBRE d'ALTERNANCES	RESULTATS ET OBSERVATIONS
1	2,29	17.639.000	Sans dommage apparent
2	3,31	23.437.000	- d° -
3	3,76	12.999.000	- d° -
4	4,29	106.000	Endommagement par déformation (Echauffement et gonflement).

Les figures 28 et 29 nous montrent l'éprouvette N° 4 après l'essai. On y distingue nettement deux plans de rupture symétrique tels que le prévoit la théorie de la rupture. La coupe de cette éprouvette nous montre la zone interne d'échauffement et le glissement des couches de toile sous l'effet de la contrainte.

7 - ESSAIS DE FLEXION ROTATIVE

Un essai de flexion rotative a été effectué à l'aide des éprouvettes connues sous le nom "d'éprouvettes de l'aéronautique". La flexion rotative étant faite d'une série de tensions/compressions à grande vitesse, elle est importante à étudier si nous voulons tenir compte dans les essais d'usure des hypothèses de M. Warren concernant les tensions et compressions superficielles.

Une série d'éprouvettes semblables a été faite (Figure 30). Ces éprouvettes étaient montées sur des moteurs à grande vitesse avec un poids à l'extrémité.



Fig. 30

Les résultats d'essais sont consignés dans le tableau suivant : (page 39).

Le diagramme logarithmique qui suit nous donne l'allure du phénomène (Figure 31).

La charge limite d'endurance en flexion rotative est de 2,5 kg/mm². Elle est inférieure à celle en compression simple, ce qui est compréhensible, les plastiques stratifiés résistant moins bien à la traction qu'à la compression.

x Cassee .
 o Pas de rupture .

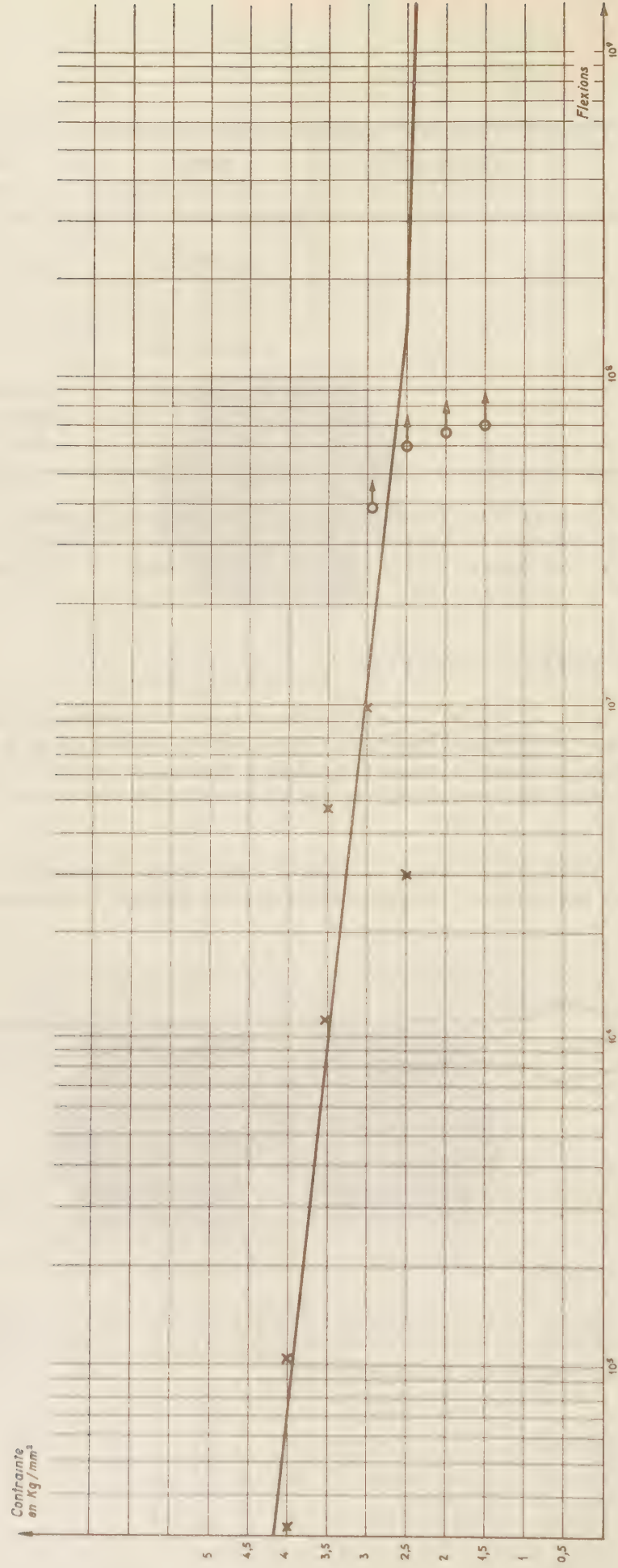


Fig . 31

EPROUVETTE N°	CONTRAINTÉ EN kg/mm ²	NOMBRE DE CYCLES	OBSERVATIONS
1	1,5	80.000.000	pas cassée
2	2,5	3.000.000	cassée
3	2	74.856.000	pas cassée
4	2,5	69.000.000	pas cassée
5	3,5	1.143.200	cassée
6	3	9.775.600	cassée
7	4	101.800	cassée
8	3	41.781.800	pas cassée
9	3,5	4.728.700	cassée
10	4	30.800	cassée.

8 - ETUDE DU COMPORTEMENT A L'HUMIDITE

Les matières plastiques réagissent ordinairement à l'humidité. Il est donc important d'étudier le comportement des matériaux utilisés dans une atmosphère humide.

Pour ceci, on a utilisé une gamme de 5 sels métalliques permettant d'obtenir des atmosphères à humidité connue. Ces sels, en solution saturée dans l'eau, maintiennent un degré hygrométrique constant dans leur atmosphère, à une température donnée. Ces composés sont énumérés dans le tableau suivant :

SEL	FORMULE	HUMIDITE EN F%	TEMPERATURE
Bichromate de sodium	$\text{Cr}^{2+} \text{O}_7^{2-} \text{Na}^2 \cdot 2 \text{H}^2 \text{O}$	62%	20°
Nitrite de sodium	$\text{NO}_2^- \text{Na}^+$	66%	20°
Chlorure d'ammonium	$\text{Cl}^- \text{NH}_4^+$	79,5%	20°
Sulfate d'ammonium	$\text{SO}_4^{2-} (\text{NH}_4^+)^2$	91%	de 20° à 30°
Chlorure de Baryum	$\text{Cl}^- \text{Ba}^{2+} \cdot 2 \text{H}^2 \text{O}$	88%	20°

Ces solutions saturées ont été versées dans des récipients clos dans l'atmosphère desquels on avait placé des galets soigneusement desséchés et mesurés auparavant. Ces récipients ont été déposés dans une chambre climatisée à 20°. Les galets utilisés proviennent de plaques de phénoplastes à base de toile. Leurs changements de dimensions ont été suivis dans le temps comme l'indique le graphique suivant (Figure 31 bis).

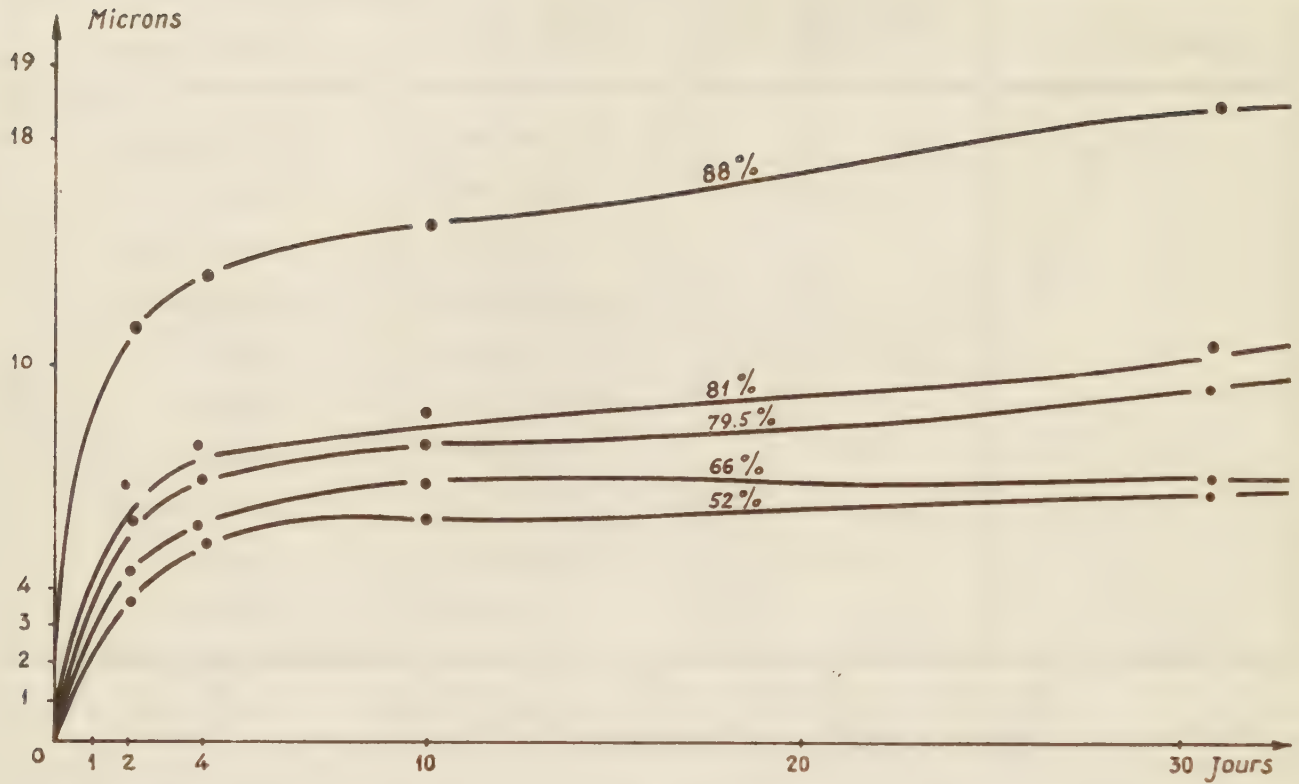


Fig. 31^{bis}

On y voit nettement que les galets atteignent, au bout de 10 jours environ, des dimensions stables après avoir eu un accroissement rapide des dimensions.

Dans les mesures qui suivront, l'humidité n'aura pas beaucoup d'importance car les galets seront gardés en permanence dans une atmosphère à degré hygrométrique variant entre 50 et 60%, donc dans un état stable. Par contre, dans le cas où ces galets seront trempés dans l'eau, il faudra prendre des précautions.

. B .

ETUDE DU PHENOMENE D'USURE

- CHAPITRE IV -

METHODE EXPERIMENTALE UTILISEE

1 - UTILISATION DE LA MACHINE "AMSLER"

a - Caractéristiques

La machine "Amsler" qui a été utilisée possède les caractéristiques suivantes:

- Entraxe variable allant jusqu'à 70 mm,
- Vitesse de rotation : 200 t/m,
- Charge appliquée de 25 à 200 kg sur des galets d'épaisseur 100 mm, soit 2,5 à 20 kg par mm.
- Rapport des vitesses de rotation des 2 axes: 1,1 - l'axe inférieur étant le plus rapide.

b - Défauts

Cette machine possède un certain nombre d'inconvénients:

- L'entraxe est trop petit; il aurait fallu pouvoir utiliser des entraxes plus grands pour étudier des engrenages gros module.
- La vitesse de rotation est assez faible.
- Le rapport des vitesses de rotation des deux axes est invariable.

Tout ceci fait que le champ d'application de cette machine demeure limité en ce qui concerne les engrenages. Il n'en demeure pas moins qu'elle reste à l'intérieur de ce domaine le meilleur outil de travail, étant complètement montée sur roulement à billes avec frottement extrêmement faible; ses appareils de mesure nous seront d'un précieux secours.

2 - SYSTEME D'ENGRENAGES ETUDIE

Nous avons étudié un couple d'engrenage calculé de façon à pouvoir s'adapter sur la machine sans qu'il soit nécessaire de lui apporter une modification.

a - Calcul des engrenages -

On prendra un couple d'engrenages ayant près de 40 mm de ligne d'action, avec un nombre de dents tels que :

$$\frac{n_2}{n_1} = 1,1 = \frac{55}{50} = \frac{t_1}{t_2}$$

t_1 et t_2 étant les nombres de tours par minute de chaque roue dentée.

On prendra le module 2,5; l'angle de pression normal $\varphi = 20^\circ$.

Les diamètres primitifs seront :

$$D_1 = 2,5 \times 50 = 125 \text{ mm}$$

$$D_2 = 2,5 \times 55 = 137,5 \text{ mm}$$

Soit

$$IT_1 = \rho_1 \quad IT_2 = \rho_2 \quad (\text{fig. 32})$$

$$\rho_1 = 0,1 \sin \varphi = 21,37 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 0,2 \sin \varphi = 23,52 \text{ mm}$$

$$T_1 T_2 = \rho_1 + \rho_2 = 44,8 \text{ mm}$$

Le tracé des cercles de tête détermine les points extrêmes A et B sur la ligne d'action où a lieu contact. On obtient en A :

$$T_1 A = 27,5 \text{ mm}$$

$$T_2 A = 18 \text{ mm}$$

On étudiera deux systèmes de galets reproduisant les conditions de contact en A avec glissement maximum et en I avec roulement sans glissement. L'engrenage de centre O_2 sera en matière plastique; celui de centre O_1 sera en acier doux. Les engrenages en matière plastique étant le plus souvent couplés avec des pignons métalliques, on étudiera spécialement l'usure dans le cas de contact de surfaces de natures différentes : acier et plastique.

Le contact en B ne présente pas d'intérêt pour nous car c'est celui de la tête de denture de l'engrenage en plastique et nous savons par tous les travaux antérieurs que l'usure est surtout localisée sur le cercle primitif et dans le creux de denture.

Les deux couples de galets sont les suivants :

1° couple : un galet en plastique de 18 mm de rayon,
un galet en acier de 27,5 mm de rayon,
le système représente le cas du roulement avec glissement maximum au fond de la denture du pignon en matière plastique (point A).

2° couple : un galet en plastique de 23,5 mm de rayon,
un galet en acier de 21,5 mm de rayon,
le système représente le cas du roulement sans glissement sur les cercles primitifs des dentures (point I).

b - Etude cinématique

Nous pouvons, tout d'abord, calculer le glissement sur le couple de galets représentant le point A.

Soit V'_g cette vitesse de glissement ω'_1 et ω'_2 les vitesses de rotation des axes de la machine "Amsler".

ENGRENAGES



GALETS

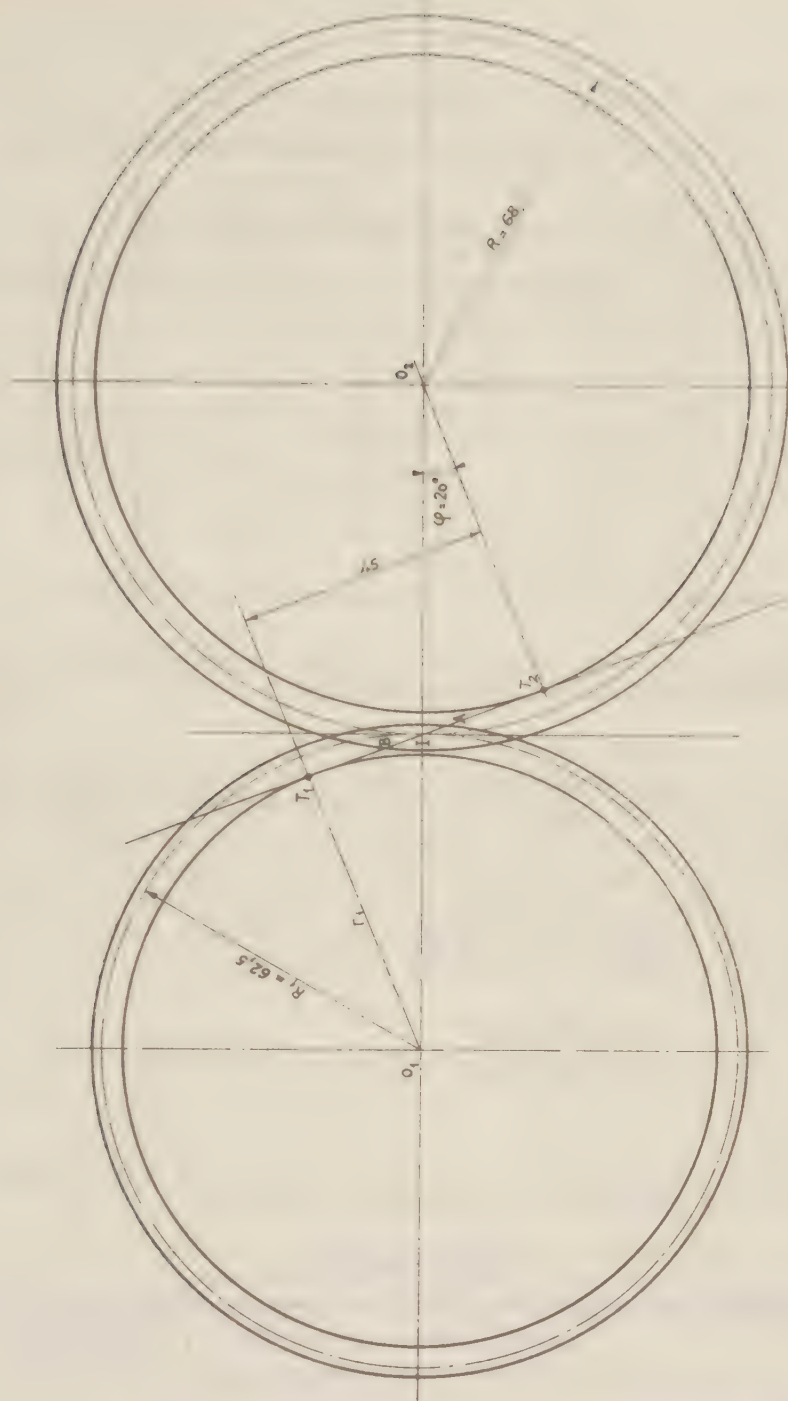
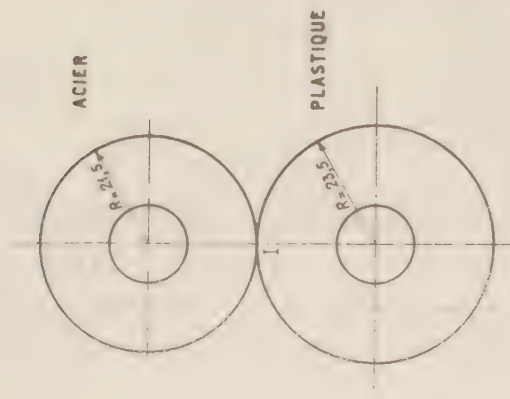


Fig. 32

$$V'_g = \rho_1 \omega'_1 - \rho_2 \omega'_2 = V_1 - V_2$$

$$V_1 = \omega'_1 T_2 A = 27,5 \frac{2\pi \cdot 200}{60} = 575,6 \text{ mm/sec.}$$

$$V_2 = \omega'_2 T_2 A = 18 \frac{2\pi \cdot 181,8}{60} = 342 \text{ mm/sec.}$$

Car il ne faut pas oublier que le rapport des vitesses des deux axes étant de 1,1 l'axe inférieur faisant 200 t/m, l'axe supérieur en fait 181,8.

$$V'_g = V_1 - V_2 = 233,6 \text{ mm/sec.}$$

C'est la vitesse de glissement maximum.

Au point I, $V_1 = \omega'_1 \times T_1 I = \omega'_2 \times T_2 I = V_2 = 450 \text{ mm/sec.}$

$$V'_g = V_1 - V_2 = 0$$

On a bien le roulement sans glissement.

Passons maintenant au glissement V_g sur la denture en A de l'engrenage; il doit être également de 233,6 mm/sec comme sur les galets.

$$V_g = I A (\omega_1 + \omega_2)$$

$$V_g = \frac{2\pi}{60} (t_1 + t_2) 5 = V'_g = 233,6 \text{ mm/sec.}$$

d'où

$$t_1 + t_2 = 446$$

$$\frac{t_1}{t_2} = 1,1 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{55}{50}$$

d'où

$$t_2 = 212 \text{ t/m}$$

$$t_1 = 234 \text{ t/m}$$

Nous avons donc toutes les caractéristiques des deux pignons et des galets leur correspondant. Nous les résumons par les tableaux suivants :

ENGRENAGES

	ENGRENAGE EN ACIER	ENGRENAGE EN PLASTIQUE
Nombre de dents	50	55
Module	2,5	2,5
Vitesse	234 t/mn	212 t/mn
Diamètre primitif	125 mm	137,4 mm
Angle de pression	20°	20°
	denture normale	denture normale

GALETS

	PREMIER COUPLE : POINT A		DEUXIEME COUPLE : POINT I	
	PLASTIQUE	ACIER	PLASTIQUE	ACIER
Diamètre en mm	36	55	47	43
Vitesse en t/m	181,8	200	181,8	200
Vitesse linéaire en mm/sec	575,6	342	450	450
Glissement	233,6	233,6	0	0

3 - EXTENSION DES RESULTATS D'ESSAIS A UN SYSTEME QUELCONQUE D'ENGRENAGES -

Le calcul de ces engrenages terminé, la question principale qui se pose est de savoir transposer les résultats expérimentaux qu'on obtiendra sur un système quelconque d'engrenages. L'étude expérimentale faite sur la machine "Amsler" nous donnera des valeurs de la charge d'endurance limite pour une matière plastique. Cependant, on objectera facilement à ces travaux qu'on ne voit pas comment les généraliser à tous les engrenages faits en cette matière. L'extension des résultats est cependant possible en étudiant les contraintes au point de contact des galets et en calculant l'effort à transmettre sur un engrenage quelconque qui fait naître une contrainte identique.

On empruntera cette extension au "Cours pratique sur la théorie et technologie des engrenages", par M.J.Capelle, Tome IV.

a - Formule de Hertz

Soit deux galets pressés l'un contre l'autre avec une force P par millimètre d'épaisseur. En appelant r_1 et r_2 les rayons ; E_1 et E_2 les modules d'élasticité; ν la pression maximum supportée par la matière, on peut définir le rayon moyen r et le module d'élasticité moyen E .

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

$$\frac{2}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

La formule de Hertz nous donne :

$$\nu = 0,59 \sqrt{\frac{PE}{r}}$$

(pour la démonstration de cette formule, voir "Théorie de l'Elasticité de Timoshenko)

b - Cas d'un couple d'engrenages quelconques -

Pour un même couple de matériau, les résultats obtenus avec deux galets particu-

liers permettent de déduire les charges d'endurance relatives à des cylindres de diamètres différents et, par extension, à des dentures d'engrenages à courbure quelconque. Il suffit, d'après la formule de Hertz, pour garantir la valeur de $\check{v}$, d'assurer la même valeur pour le quotient $p = \frac{P}{r}$ homogène à une pression.

Prenons le couple de galets de rayons r_1 et r_2 , de module d'élasticité E_1 , soit P_1 la charge d'endurance limite qu'il nous donne. La formule de Hertz donnera la pression maximum $\check{v}_1$; on aura :

$$P_1 = \frac{P}{r_g} \quad r_g \text{ étant le rayon de courbure moyen des galets.}$$

Prenons maintenant un couple d'engrenages quelconque fait avec les mêmes matériaux (Figure 33). On se place en position moyenne sur le primitif. Les rayons de courbure des galets en contact sont :

$$IT_1 = R_1 \sin \varphi \quad IT_2 = R_2 \sin \varphi$$

R_1 et R_2 = rayons du cercle primitif, φ étant l'angle de pression,

d'où le rayon moyen des dentures, r_e .

$$\frac{2}{r_e} = \frac{1}{R_1 \sin \varphi} + \frac{1}{R_2 \sin \varphi}$$

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{M \sin \varphi} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)$$

avec M le module, n_1 et n_2 les nombres de dents.

Pour assurer la même valeur de $\check{v}$ aux galets et aux engrenages, il faut avoir :

$$P_1 = \frac{P_1}{r_g} = \frac{P_2}{r_e}$$

P_1 est déduit de P_1 charge d'endurance limite; on a donc :

$$P_2 = P_1 \times r_e = \frac{P_1 M \sin \varphi}{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

c - Remarque :

On pourra objecter que cette formule est valable uniquement dans le cas du roulement sans glissement car on s'est placé en I sur le diamètre primitif. Elle n'est alors applicable que pour la valeur de P_1 obtenue à l'aide du couple de galets de roulement pur.

Dans le cas du glissement, il faut se placer au point A (Figure 32).

On a alors :

$$T_1 A = \sqrt{O_1 A^2 - O_1 T_1^2} = \sqrt{(R_1 + M)^2 - R_1^2 \cos^2 \varphi}$$

$$T_1 T_2 = (R_1 + R_2) \sin \varphi$$

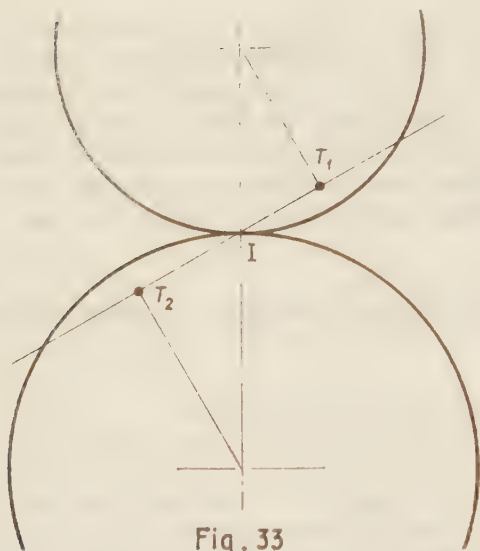


Fig. 33

$$T_2 A = (R_1 + R_2) \sin \varphi - \sqrt{(R_1 + M)^2 - R_1^2 \cos^2 \varphi}$$

$$\frac{2}{c} = \frac{1}{T_1 A} + \frac{1}{T_2 A}$$

Un calcul analogue au précédent, nous donne la valeur de P_2

$$P_2 = p_1 \frac{M [(n_1 + n_2) \sin^2 \varphi (n_1 + 2)^2 - n_1^2 \cos^2 \varphi - (n_1 + n_2)^2 + n_1^2 \cos^2 \varphi]}{(n_1 + n_2) \sin \varphi}$$

En réalité, cette formule compliquée ne nous sera pas très utile comme le montrera la suite des résultats expérimentaux.

CHAPITRE V

USURE D'ENGRENAGES EN PHENOL FORMALDEHYDE

A BASE DE TOILE

(P 44 classe 2)

ROULEMENT AVEC GLISSEMENT

1 - MATERIAU EMPLOYE -

Les phénols formaldéhydes à stratifications de toile sont composés de couches de tissu de coton imprégné de résines hautement polymérisées. Leur degré Martens (résistance à la chaleur) varie de 100 à 135. Ils sont tous thermo-durcissables. Ces couches de tissu sont empilées et fortement comprimées à la presse. On obtient ainsi un matériau anisotrope. La qualité utilisée pour les essais comprenait 15 couches de tissu par cm d'épaisseur. Le tissu était fait de mailles de 1 mm de largeur environ. Tout ceci formait un plastique de masse spécifique 1,3 facilement usinable et résistant à presque tous les acides et alcalis.

2 - DIAGRAMME D'USURE -

Une série de courbes d'usure a été tracée par la méthode citée auparavant, à l'aide de la machine Amsler. On s'est placé au point de denture où il y a le maximum de glissement, donc dans les conditions les plus défavorables. La machine a travaillé avec des charges croissantes allant de 4 kg/mm à 10 kg/mm et des vitesses de rotation de 200 à 181 t/m (Figure 34).

L'usure a été mesurée par la moyenne des usures sur trois diamètres à 120°. On a obtenu une série de 7 courbes croissantes. Les essais pour chaque charge ont été arrêtés au moment où on assistait à une stabilisation du phénomène d'usure, c'est-à-dire lorsque la courbe devenait rectiligne.

Nous pouvons remarquer l'allure des courbes. Elles débutent par une partie rectiligne, s'incurvent par la suite et se stabilisent finalement sur une droite de pente supérieure à la première. Le passage d'une droite à l'autre se fait graduellement.

Le changement de pente pour la courbe de 5 kg est très faible; il est nul pour la courbe de 4 kg. On prendra donc 4 kg comme charge d'endurance limite cherchée: celle où on a usure lente et régulière sans changement brusque.

En observant dans le détail ce qui se passe près de l'origine (Figure 35), on peut avoir plus de renseignements sur le début de l'usure. En prolongeant les parties rectilignes initiales jusqu'à ce que les courbes se séparent d'elles, on obtient une série de points intéressants: A, B, C, D, E, F. Ils représentent les instants où le phénomène d'usure change

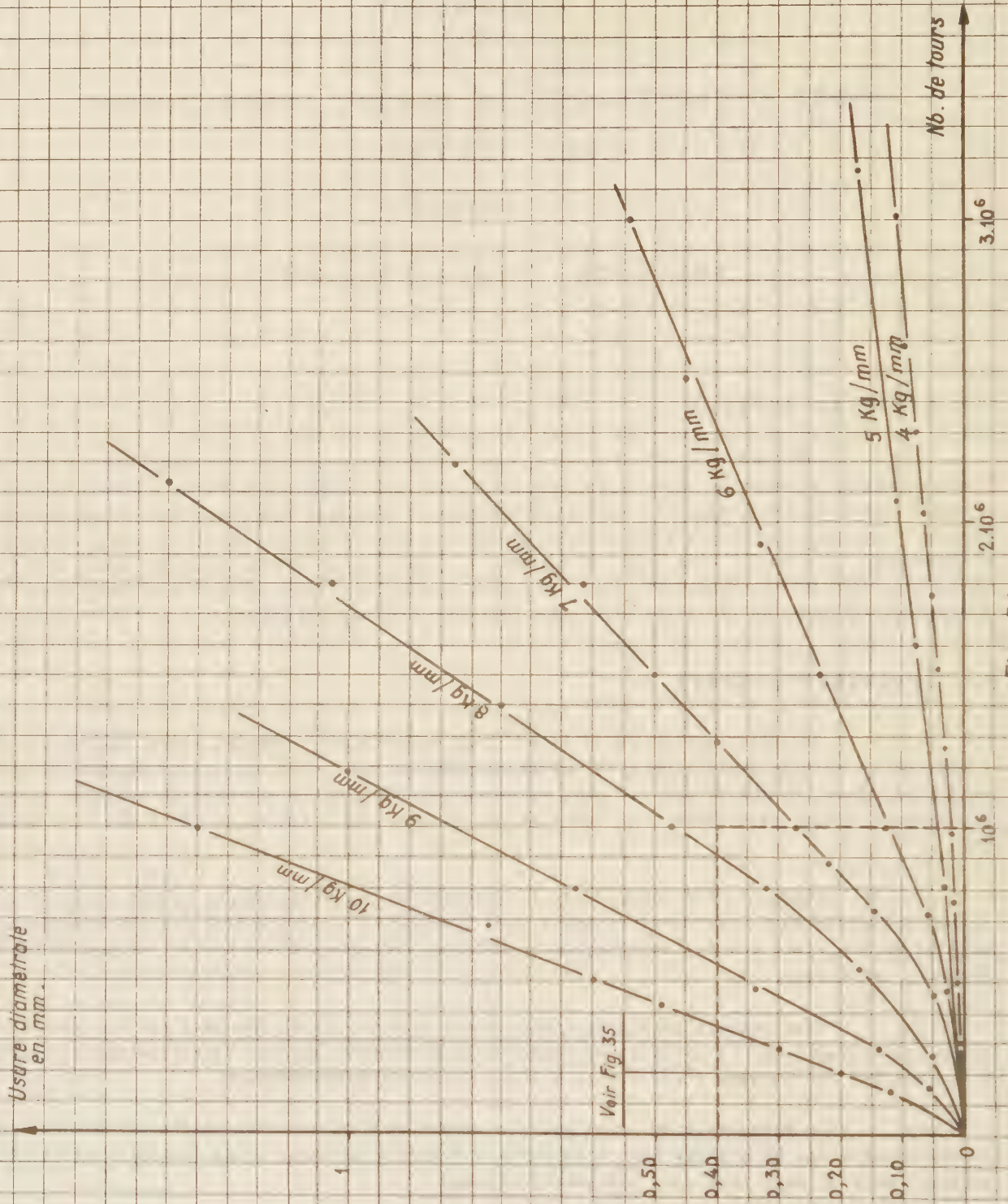
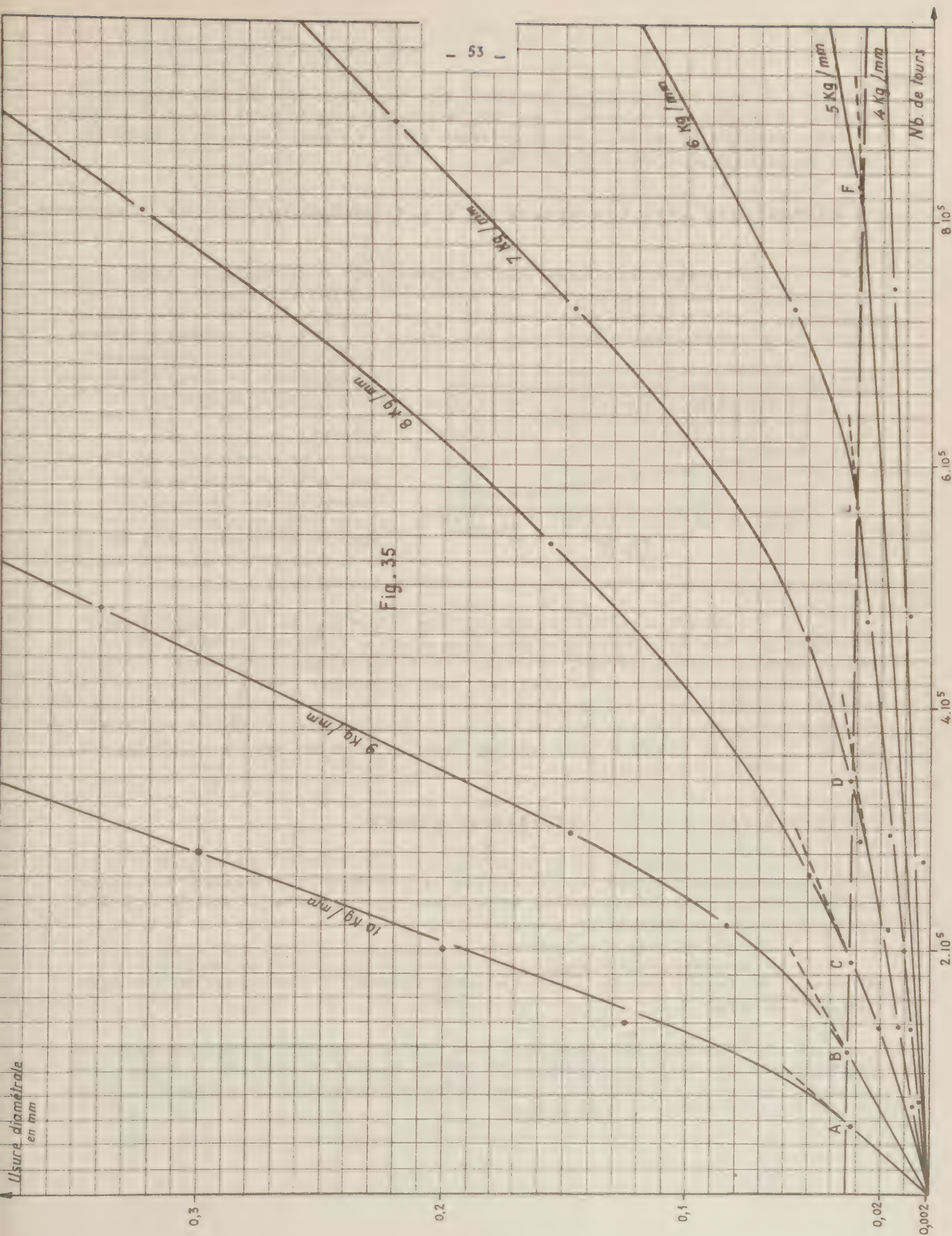


Fig. 34



d'aspect, où il cesse d'être linéaire. Ces points sont tous situés dans une zone horizontale d'ordonnée allant de 0,02 à 0,04 mm. Il est donc fort possible que le galet forme à sa surface une couche superficielle par suite d'un écrouissage. C'est la disparition de cette couche par l'usure qui fait changer l'aspect du phénomène.

3 - COMPARAISON AVEC LES ESSAIS DU M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology)

Le professeur Buckingham, dans ses essais du M.I.T. sur des galets métalliques, utilise une représentation graphique avec double échelle logarithmique. Il porte en abscisse le nombre de tours nécessaires pour aboutir aux points où on assiste à une détérioration apparente du galet et, en ordonnée, la charge correspondante (Figure 36). Il obtient une droite de pente

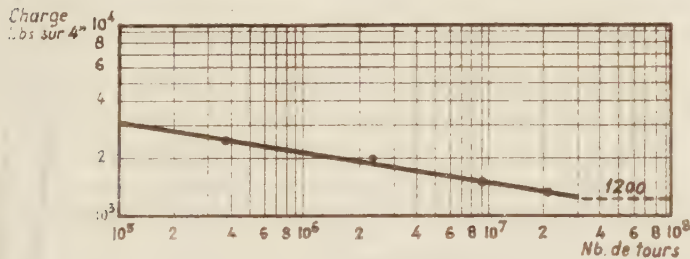


Fig. 36

négligable se terminant par une horizontale donnant la charge d'endurance limite. Une droite semblable peut être tracée à l'aide des courbes d'usure en matière plastique. On utilise un diagramme à double échelle logarithmique avec, en abscisse, le nombre de tours nécessaires pour que le phénomène change d'allure, c'est-à-dire les abscisses des points A, B, C, D, E, F de la figure 35. En ordonnée, on porte

les charges linéaires correspondantes par mm d'épaisseur du galet.

On obtient une droite de pente inclinée se terminant par une horizontale pour 4 kg (Figure 37). Une analogie peut donc être faite entre les essais sur plastiques et les essais sur métaux. Dans les deux cas, il y a pour les fortes charges, détérioration superficielle suivie de changement qualitatif et quantitatif dans le phénomène d'usure. Seulement dans le cas des métaux, le changement est brusque et appréciable à l'œil nu en examinant la surface que l'on voit s'écailler et s'en aller par lamelles. Dans le cas des plastiques, on assiste uniquement à un changement d'allure de l'usure et à une modification de l'état de surface que nous étudierons plus loin.

4 - COMPARAISON AVEC LES COURBES DE WOHLER

Les essais de fatigue de métaux entrepris par Wohler lui avaient permis de tracer un diagramme portant, en abscisse sur une échelle logarithmique, le nombre d'alternances à appliquer à l'éprouvette et, en ordonnée, la contrainte correspondante. Il avait obtenu ainsi une droite inclinée se terminant par une horizontale.

Ces essais ont été repris par la suite par Mr. L'Hermite au Laboratoire des Bâtiments et des Travaux Publics, sur des matières plastiques. Il avait obtenu des phénomènes d'allures semblables.

Reprenons les points A, B, C, D, E, F de la figure 35. On trace une courbe avec, en abscisse sur une échelle logarithmique, les nombres de tours correspondant à ces points et, en ordonnée sur une échelle métrique, les contraintes correspondant à ces points. Ces contraintes sont calculées d'après la forme de Hertz.

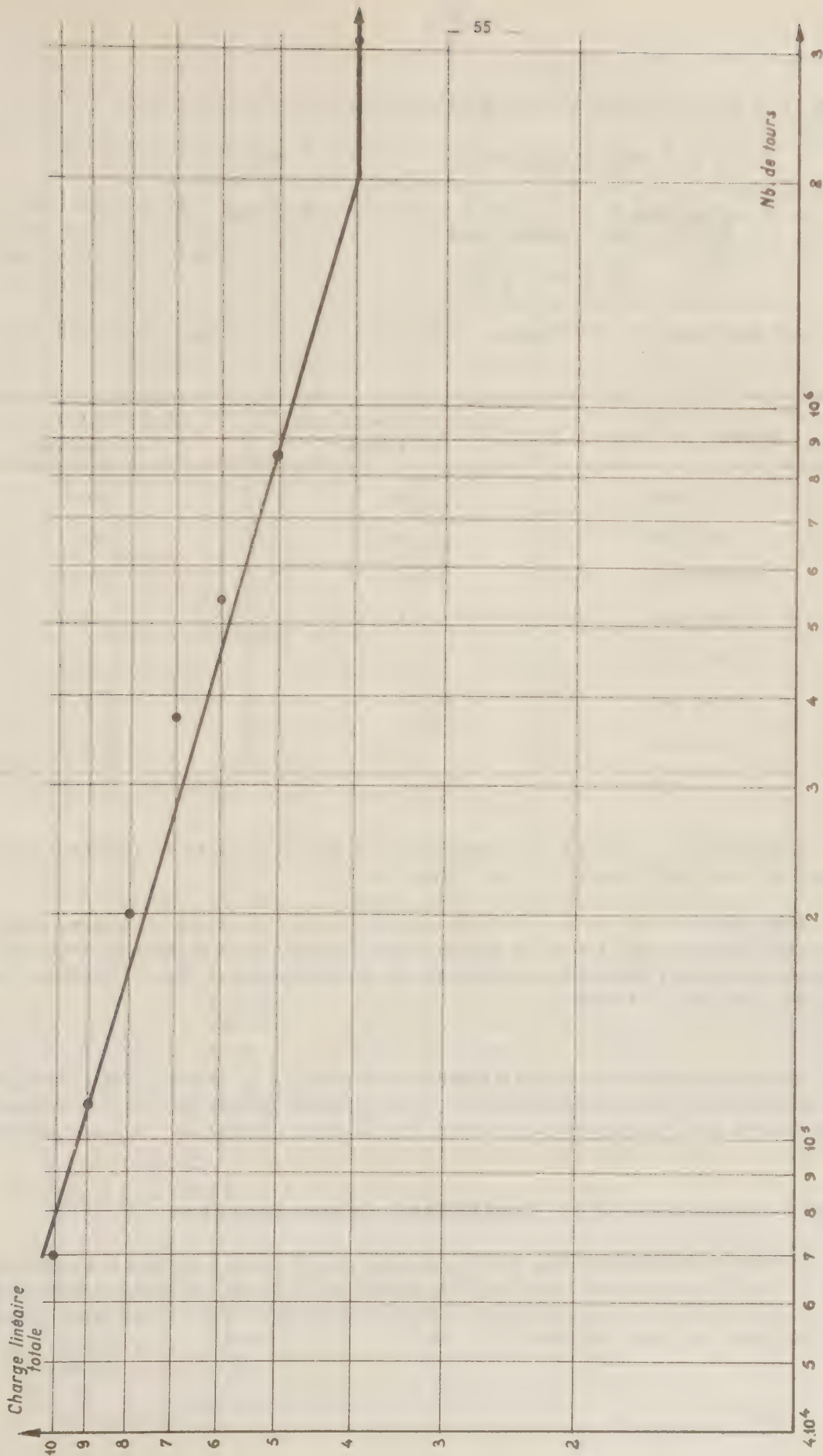


Fig. 37

Le rayon moyen et le module d'élasticité moyen sont :

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{27,5} + \frac{1}{18} \quad r = 21,7 \text{ mm}$$

$$\frac{2}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} = \frac{1}{22.000} + \frac{1}{440} \quad E = 862$$

$$V = 0,59 \sqrt{\frac{PE}{r}}$$

Le tableau suivant nous donne les différentes valeurs de la contrainte pour chacun des points étudiés.

	NOMBRE DE TOURS	CHARGES LINEAIRES en kg/mm	CONTRAINTES en kg/mm ²
A	70 000	10	11,8
B	110 000	9	11,1
C	270 000	8	10,5
D	350 000	7	9,8
E	570 000	6	9,1
F	820 000	5	8,3
G	Infini	4	7,4

Nous obtenons un nouveau diagramme avec une droite inclinée se terminant par une horizontale pour une contrainte égale à 7,4 kg (Figure 38).

Nous voyons qu'il y a une profonde analogie entre les essais d'usure et ceux de contraintes répétées. Ce diagramme tendait à prouver que les phénomènes d'usure ne sont, au fond que des phénomènes de fatigue périodiques comme dans le cas envisagé par Mr. L'Hermite. Ils correspondent tous les deux à la même loi.

Remarque

Si nous comparons les résultats obtenus à la figure 38 avec ceux du pulsateur Schenck (figure 27) où on a également travaillé à la compression périodique, nous remarquons une différence notable dans les charges d'endurance limite. Nous verrons par la suite que le lubrifiant est pour une grande part dans cette différence expérimentale constatée.

5 - ANALOGIE ENTRE LES DEUX DIAGRAMMES LOGARITHMIQUES

Si nous reprenons les deux courbes des figures 37 et 38, nous remarquons que la première a, en ordonnée, des charges linéaires P sur une échelle logarithmique; la seconde a, en ordonnée, des contraintes calculées d'après la formule de Hertz, mais sur une échelle métrique; dans les deux cas, on a des droites.

En réalité, il est facile de montrer que ces deux droites n'en forment qu'une seule.

Sur la figure 37, nous portons, en fait, la valeur $\log P$ sur une échelle linéaire. Sur la figure 38, nous portons la valeur $K\sqrt{P}$ d'après la théorie de Hertz. Or, il est facile de vérifier comme le montre le tableau suivant que le rapport $\frac{\sqrt{P}}{\log P}$ est sensiblement constant entre les valeurs 4 et 10.

P	$\frac{\sqrt{P}}{\log P}$	K'
4	$\frac{2}{0,60}$	3,3
6	$\frac{2,45}{0,69}$	3,5
8	$\frac{2,83}{0,77}$	3,7
10	$\frac{3,16}{0,84}$	3,8
15	$\frac{3,87}{0,90}$	4,3
20	$\frac{4}{1,00}$	4,0
100	$\frac{10}{2}$	5,0

Ceci nous incite à penser également qu'il n'y a pas de différence fondamentale entre les essais du M.I.T. sur des galets cylindriques et les essais de Wohler sur des éprouvettes en contraintes périodiques, dans le cas des métaux. Dans le cas des matières plastiques les essais entrepris au Laboratoire du Rêtiment et des Travaux Publics et les essais sur la machine Amsler avec galets en plastique sont également des phénomènes de la même nature. Dans un cas comme dans l'autre, on a formation de cycles d'hystérésis dans la matière, déplacement de ce cycle vers la droite, puis stabilisation ou rupture suivant la valeur des contraintes appliquées.

6 - ETUDE DE L'USURE EN FONCTION DE LA CHARGE

En reprenant le réseau de courbes des figures 35 et 36, il nous est possible, par un changement d'une des abscisses, d'étudier l'usure en fonction de la charge pour un nombre de tours donné. On porte en abscisse les charges linéaires supportées par les galets et en ordonnée les usures correspondantes pour un nombre de tours bien déterminé. On obtient ainsi la figure 39. On y voit nettement la croissance de l'usure qui prend une forme exponentielle pour les charges trop fortes.

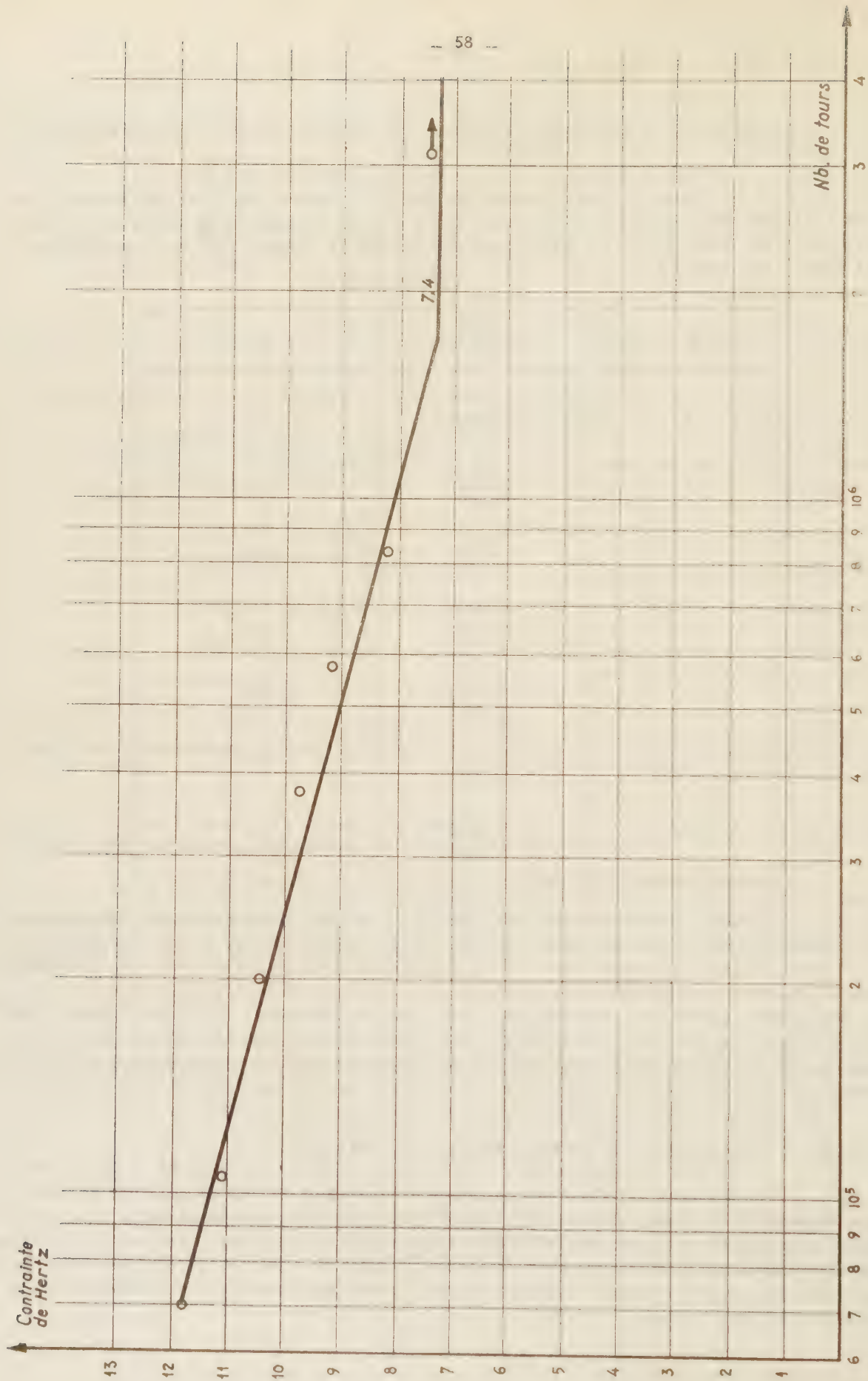


Fig 38

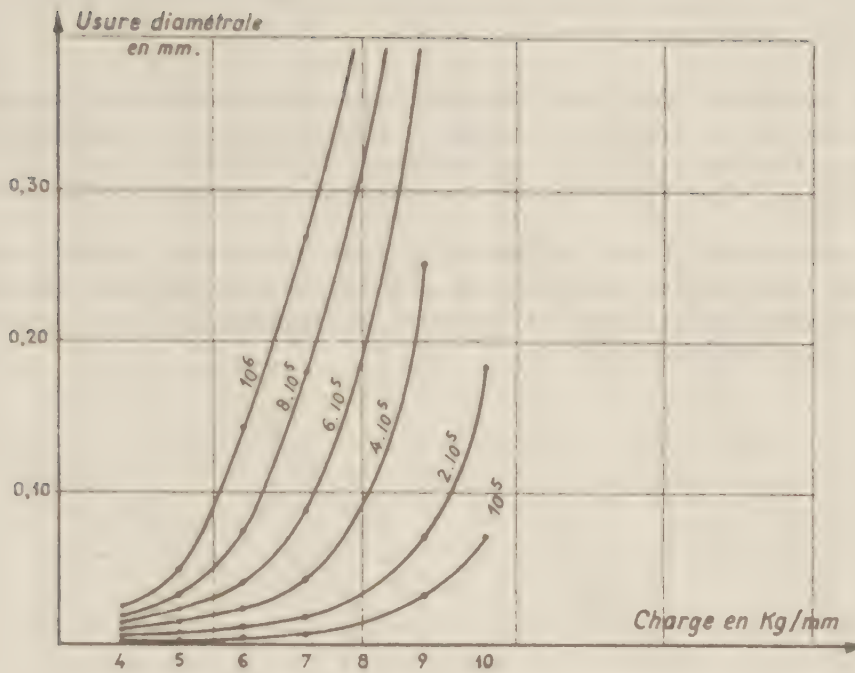


Fig. 39

7 - ETUDE DU TRAVAIL DEPENSE

a - Calcul du travail

Le calcul du travail se fait facilement d'après la conception de la machine Ansler. Nous avons vu que le galet totalisateur tourne sur un disque D mis en mouvement par l'axe inférieur de la machine. Le système d'engrenages les reliant est tel qu'à 100 tours de l'éprouvette inférieure correspond 1,62 tour du disque D (Figure 40). Le rayon du disque ainsi que la longueur de l'échelle des couples est de 80 mm. Si l'index du couple est au zéro, le galet est au centre O du disque et ne tourne pas. S'il est au maximum de l'échelle, pour M cm/kg, il parcourt un chemin égal à $2\pi D$ soit $160 \times \pi$. Le diamètre du galet totalisateur étant de 41,3 mm, il tournera de :

$$\frac{160 \times \pi}{41,3 \times \pi} = 3,874 \text{ tours}$$

pendant un tour du disque. Pendant 100 tours de l'éprouvette, il fera :

$$1,62 \times 3,874 = 6,28 \text{ soit } 2\pi \text{ tours (pour } M \text{ cm./Kg)}$$

Si l'index du couple est au milieu de l'échelle en m, le

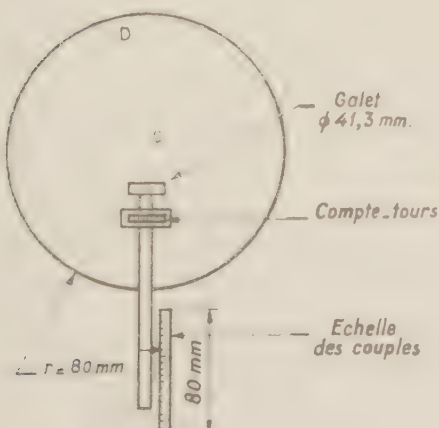


Fig. 40

galet tournera de $2\pi \frac{m}{M}$ tours pour 100 tours de l'éprouvette. Or, le travail transmis dans ce cas est $m \times 2\pi \times 100$, en kilogramme/centimètre. Donc, en multipliant le nombre de tours du galet totalisateur par M , on a directement le travail en Kgm.

Ceci a été fait pour les différentes éprouvettes essayées; on a obtenu le réseau de courbes de la figure 41. On y voit que le travail d'usure, d'abord croissant linéairement, augmente par la suite légèrement par suite du changement de qualité de l'usure qui amène forcément une modification de l'état de surface et, par conséquent, augmente la force de frottement.

Un autre point que l'on ne remarque pas sur ces courbes, c'est que pendant les premiers instants de fonctionnement du galet, la puissance absorbée est beaucoup plus grande que par la suite car le rodage des surfaces s'effectue et le frottement est fort. La stabilisation se produit au bout d'une demi-heure environ.

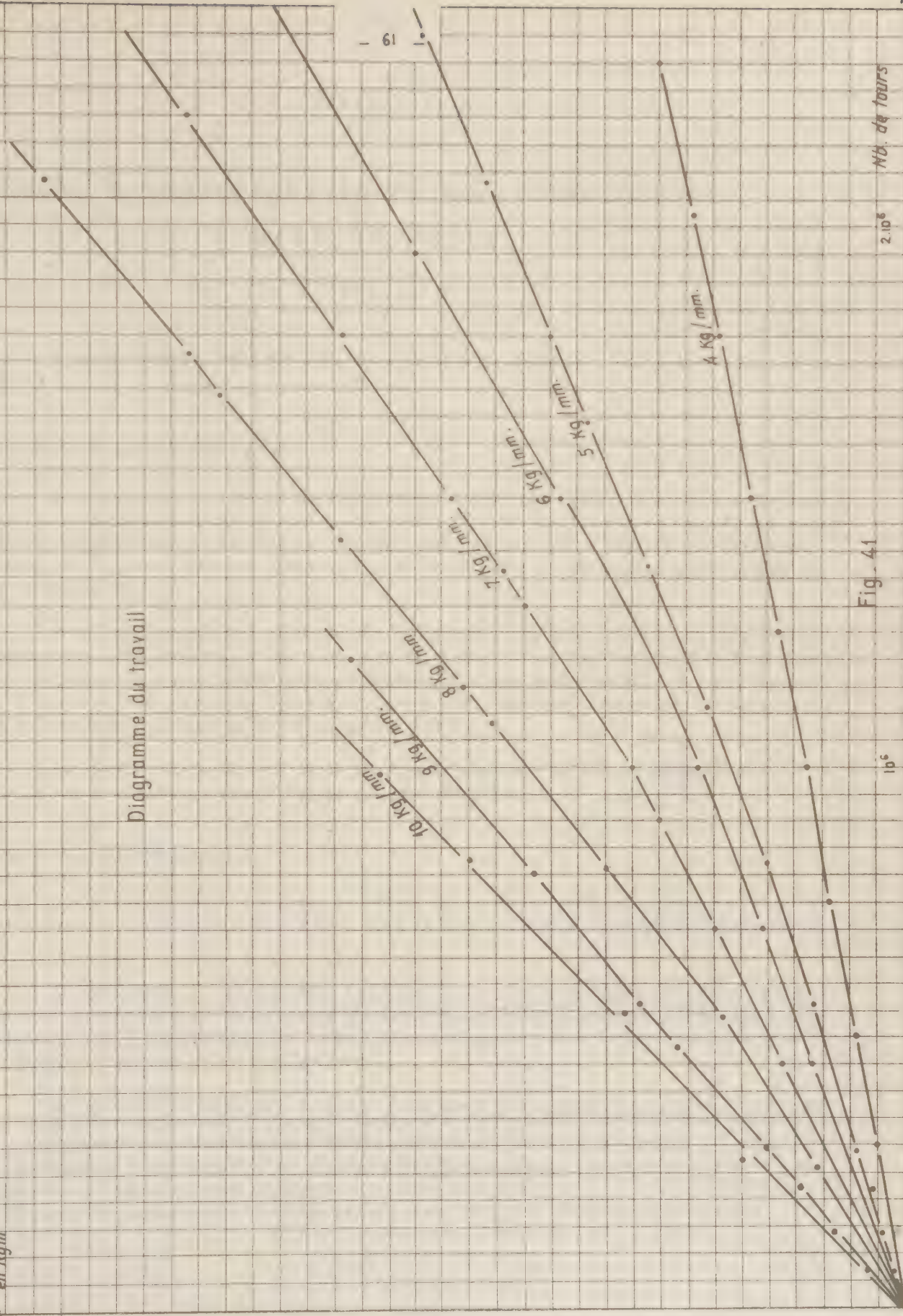
Travail
en Kgm

Diagramme du travail

- 61

10⁶ 2.10⁶ 4.10⁶ 6.10⁶ 8.10⁶ 10.10⁶

Fig. 41



- CHAPITRE VI -

USURE D'ENGRENAGES EN PHENOL FORMALDEHYDE

A BASE DE TOILE

(P 44 Classe 2)

ROULEMENT SANS GLISSEMENT

1 - CONDITIONS DES ESSAIS -

Les essais de roulement sans glissement ont eu lieu dans les conditions prévues au chapitre IV. On a pris un couple de galets de rayons 21,5 mm et 23,5 mm. Le rapport des vitesses angulaires des deux axes de la machine "Amsler" étant de 1,1, il en résulte que les deux galets roulent sans glisser l'un sur l'autre. On est alors dans les conditions cinématiques du point I de la figure 32.

Pour être certain que le roulement s'effectue sans aucun glissement, une précaution supplémentaire est à prendre, c'est de rompre la chaîne cinématique reliant les deux axes de rotation. On sépare les deux engrenages qui entraînent l'axe supérieur à partir de l'axe inférieur. L'axe supérieur est ainsi libre et le galet qui y tourne est entraîné par la force du ressort qui comprime les deux galets l'un contre l'autre.

La lubrification se fait de la même façon que dans le cas du roulement avec glissement, par un bac d'huile dans lequel baigne le galet inférieur.

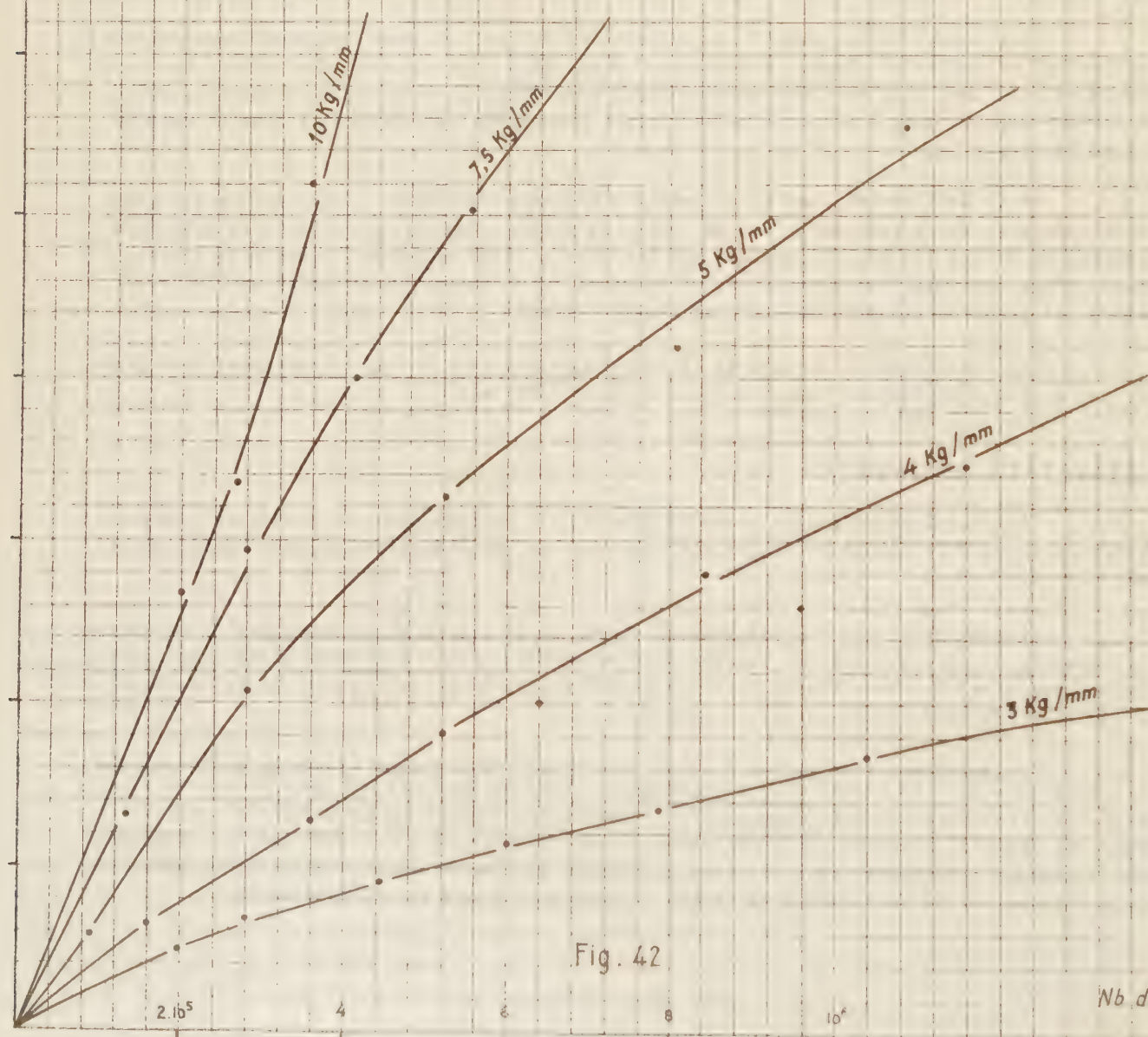
2 - RESULTATS OBTENUS -

Par cette méthode on a tracé un réseau de 5 courbes pour des pressions linéaires s'échelonnant entre 3 et 10 kg/mm (Figure 42). Dans ce cas, la charge d'endurance limite est de 3 kg/mm.

En comparant ces courbes avec le réseau de la figure 35 représentant le roulement avec glissement, on constate que les courbes d'usure ont une allure nettement différente. Après une usure suivant une loi rectiligne, on a une légère incurvation vers le bas suivie de stabilisation ; en tous les cas, pas de rupture brusque.

Un autre point important à noter, c'est que l'usure dans le cas du roulement pur est plus forte que dans le cas où il y a glissement. C'est un résultat qui peut nous sembler paradoxal, le glissement d'une surface contre une autre étant toujours générateur d'usure.. Cependant, ce résultat expérimental s'est retrouvé par la suite dans tous les autres essais sur d'autres matériaux plastiques, dans d'autres conditions de travail et avec d'autres méthodes de mesure de l'usure. Il ne peut donc être imputé au hasard ou à une erreur expérimentale.

Usure
diamétrale



3 - INTERPRETATION DES RESULTATS -

Ces résultats, au fond, ne doivent pas nous étonner car on les retrouve dans plusieurs cas expérimentaux. M. Warren, dans les "Transactions of the A.S.M.E." (Mai 1944, page 306), signale l'existence de piqures sur les dents d'engrenages au voisinage du cercle primitif, à l'endroit où a lieu le roulement sans glissement. Ces petites piqures sont localisées sur le cercle primitif et légèrement en dessous.

L'étude des engrenages hypoïds nous apprend que ceux-ci sont animés d'un glissement relatif très important; ils n'ont pas de roulement pur. Or, il est connu que ces engrenages à puissance égale s'usent beaucoup moins que des engrenages droits ou côniques qui ont des zones de roulement pur. Le cas expérimental que nous avons trouvé n'est donc pas un fait unique. Son explication est assez simple; elle se base sur la théorie de la lubrification des engrenages.

Cette théorie due aux travaux de REYNOLDS, de la "Vacuum Oil C°" du Centre d'Etude des Coussinets, nous indique les analogies entre les engrenages et les paliers lisses.

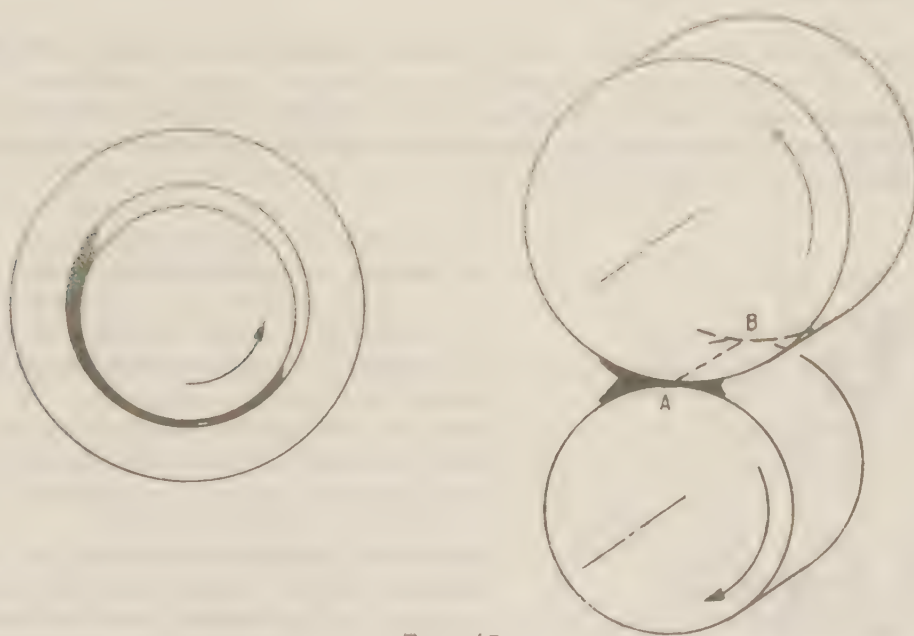


Fig. 43

Supposons le cas de deux galets tournant en sens inverse sans glisser. En versant de l'huile sur eux, une couche y adhère. Dans la zone de contact, elle aura tendance à être chassée vers les extrémités. Du fait de sa viscosité, une petite quantité d'huile arrive à franchir la zone de contact et tend à écarter les deux cylindres. Si la vitesse périphérique est grande, le contact faible et l'huile de forte viscosité, une grande quantité de celle-ci passera entre les cylindres; il se forme un coin d'huile. Par contre, à faible vitesse, à pression de contact élevée, à huile très fluide, le lubrifiant est rejeté vers les extrémités; le

coin d'huile a beaucoup de mal à se former.

Si un des deux cylindres a une vitesse périphérique plus faible que l'autre, en plus du roulement il se produit un glissement relatif des deux cylindres. Plus l'effet combiné du roulement et du glissement sera grand, plus grand sera le coin de lubrifiant et plus épais sera le film d'huile.

Dans le cas expérimental étudié par la machine "Amsler", avec roulement et glissement, celui-ci est considérable car on se place dans une zone de fond de denture. Le coin d'huile créé est donc très fort et amène forcément une répartition des pressions superficielles plus large que ne le prévoit la théorie de Hertz. Les formules théoriques ne sont donc pas tout à fait correctes. Ceci a d'ailleurs été remarqué dans le chapitre V en comparant les résultats des essais d'usure avec ceux des compressions périodiques. La contrainte d'endurance limite était de $7,4 \text{ kg/mm}^2$ à la machine "Amsler" et de $3,7 \text{ kg/mm}^2$ au pulsateur Schenck. Le coin d'huile formé entre les deux galets, adoucissant les pressions, permettait une meilleure résistance du galet par rapport à l'éprouvette de compression. Il faut noter d'autre part que cette différence des contraintes entre les deux essais est due également au fait que, dans le galet, la charge excessive ne s'applique que sur la droite de contact ; les régions avoisinantes ont une fatigue beaucoup moindre et soutiennent la zone travaillant d'une façon excessive. Ceci n'a pas lieu dans l'essai de compression au pulsateur Schenck où toute la pièce est comprimée très fortement et par conséquent, cède avec plus de facilité.

Dans le cas du roulement sans glissement, le coin d'huile se forme beaucoup plus difficilement, les contraintes produites sont plus proches des valeurs théoriques et la charge d'endurance limite baisse; elle est de 3 kg/mm^2 , ce qui correspond à une contrainte de $6,4 \text{ kg/mm}^2$. Le chiffre est notablement plus faible que dans le premier cas et se rapproche davantage du cas de compression simple.

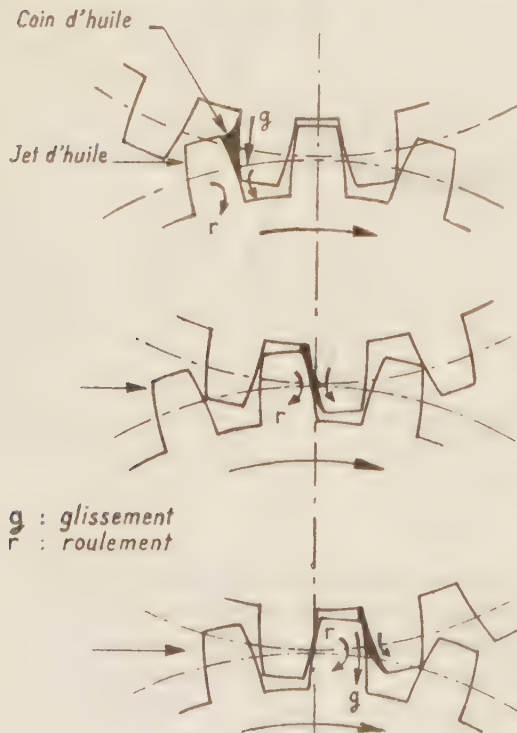


Fig. 44

En reprenant le cas des engrenages lubrifiés, le glissement est nul lorsque le contact s'effectue sur le cercle primitif. L'épaisseur du film d'huile dépend de l'action combinée du roulement et du glissement (Figure 44). Il se forme donc dans de bonnes conditions au début et à la fin du contact. Dans la zone du primitif où l'effet du combiné est faible, on arrive à la lubrification limite d'où les piqures qui s'en suivent.

Dans les engrenages parallèles ou concourants à denture droite, le glissement est perpendiculaire aux droites de contact; le film d'huile se forme dans les conditions les plus favorables.

Dans les engrenages hypoids, le glissement étant très fort, le film d'huile peut également se former dans de bonnes conditions.

- CHAPITRE VII -

USURE D'ENGRENAGES EN PHENOLS FORMALDEHYDES STRATIFIES A BASE DE TOILE

(P 44 Classe 1)

1 - DESCRIPTION DU MATERIAU EMPLOYE

Le phénoplaste stratifié P 44 classe 1 n'a pas une très grande différence, du point de vue aspect extérieur, avec le phénoplaste de la classe 2. Ils sont tous deux de couleur brune, formés de couches de tissu superposées. La différence principale réside dans leur structure; alors que le second avait 26 fils par cm, le premier n'en a que 16. Le tissu étant plus gros ceci amènera des changements intéressants dans le comportement à l'usure des engrenages fabriqués à l'aide de ce produit.

2 - ROULEMENT AVEC GLISSEMENT

Les essais de roulement avec glissement ont été faits avec des couples de galets identiques à ceux du chapitre IV, donc pour les engrenages semblables à ceux de la figure 32. Le plastique de la classe 1 peut servir à fabriquer des engrenages de cette dimension de la même façon que le plastique de la classe 2.

Les essais effectués à l'aide de la machine "Amsler" nous ont donné les courbes suivantes (Figure 45).

L'examen de ces courbes nous permet quelques remarques :

- a) - La charge d'endurance limite, dans le cas du plastique classe 1 est de 3 kg/mm alors qu'elle était de 4 kg/mm pour le plastique classe 2.

Le matériau étudié résiste donc moins bien à l'usure. Cela est compréhensible l'armature de tissu étant plus espacée.

- b) - Pour les charges supérieures à 3 kg/mm, on assiste également au changement brusque de direction dans les courbes, puis à une stabilisation de l'usure dont le caractère se transforme.

- c) - En portant les points des courbes où les pentes augmentent brusquement sur un diagramme logarithmique, avec en abscisse le nombre de tours effectué et en ordonnée la charge appliquée par mm, on obtient de nouveau une droite (Figure 46).

Le phénomène d'usure obéit donc aux mêmes lois que dans le premier cas, avec des valeurs numériques différentes.

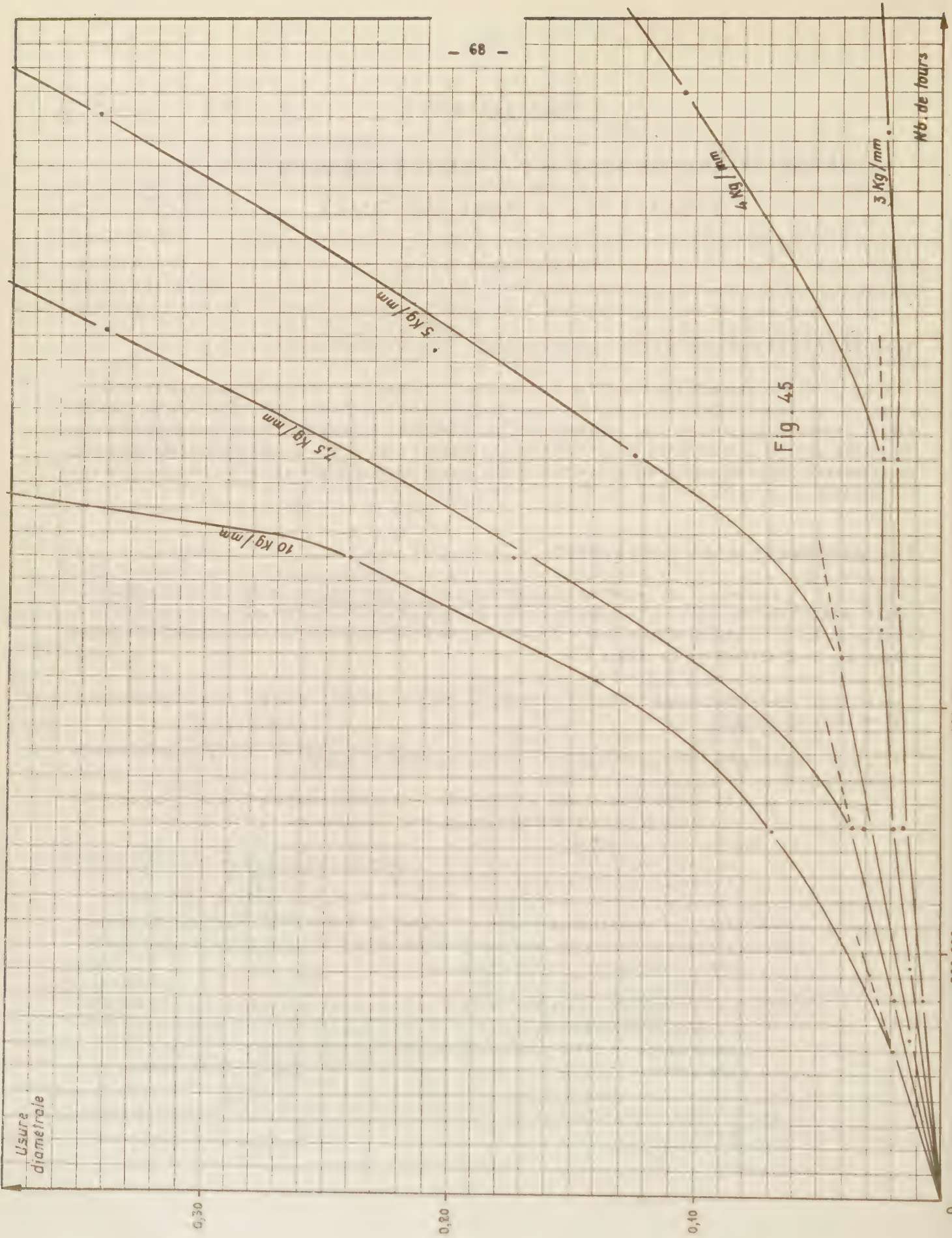


Fig. 45

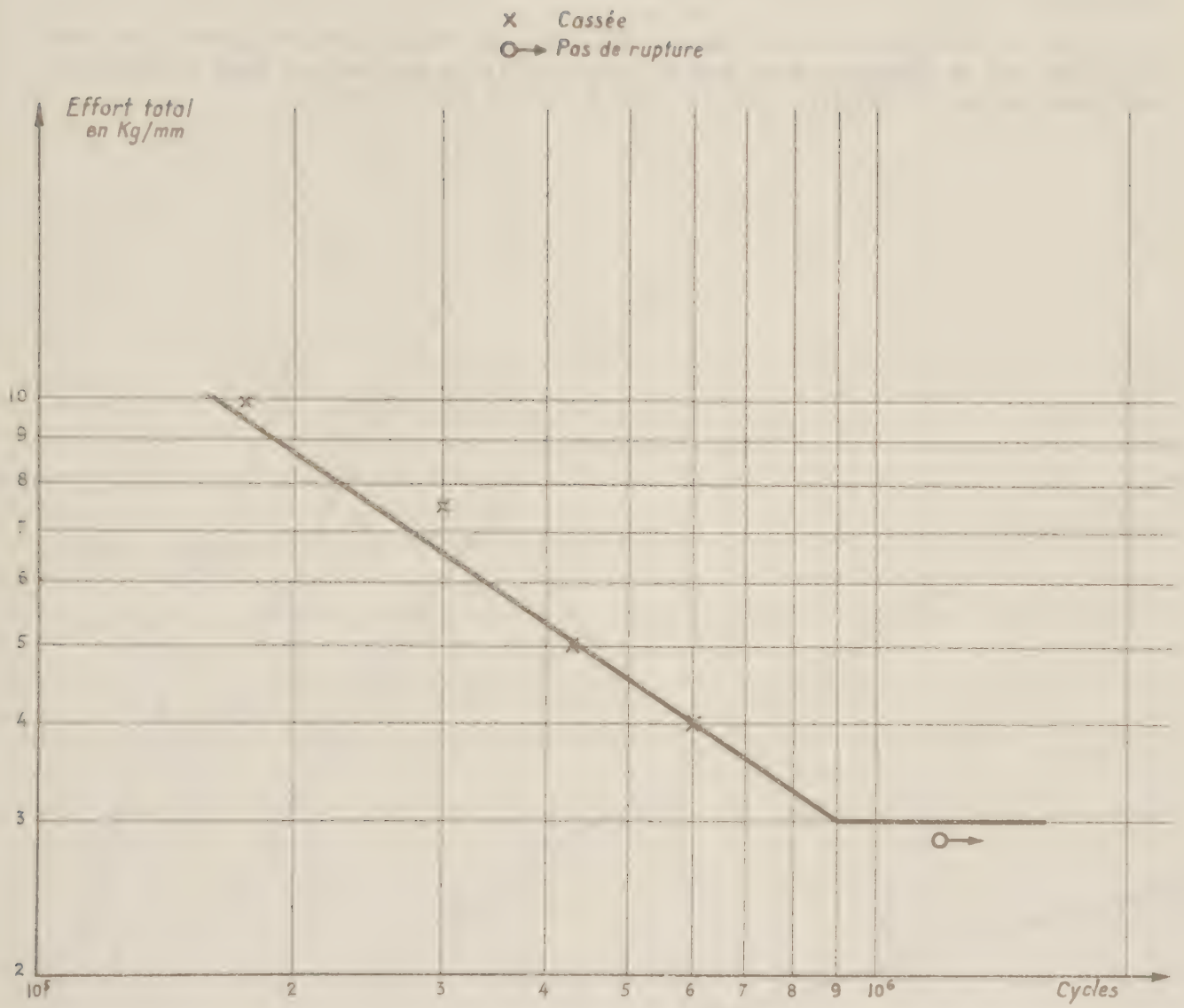


Fig .46

3 - ROULEMENT SANS GLISSEMENT -

Des essais de roulement sans glissement ont été effectués dans les mêmes conditions que dans le chapitre VI. Les résultats obtenus ont été marqués sur la *figure 47*.

On y voit dans ce cas également, l'allure des courbes du même genre que dans la *figure 42*.

Ce qu'on peut y noter surtout c'est que la charge d'endurance limite y est plus faible que dans le cas du roulement avec glissement. C'est un résultat qui était à prévoir et qui trouve ici sa confirmation. Elle est alors de l'ordre de 2,5 kg/mm².

Usure diamétrale

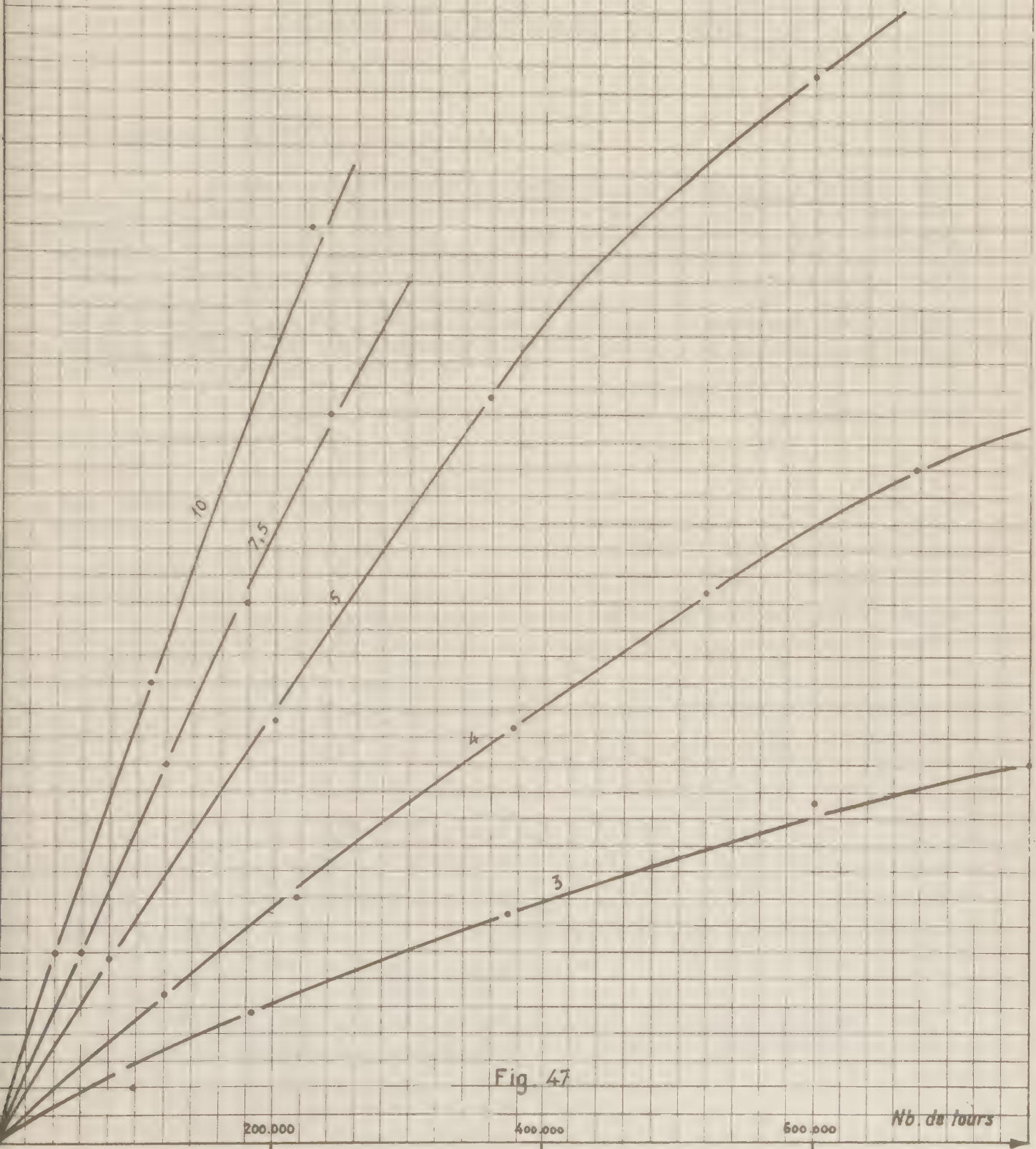


Fig. 47

Nb. de tours

- CHAPITRE VIII -

USURE D'ENGRENAGES EN PHENOL FORMALDEHYDE
A BASE DE FEUILLES DE BOIS

I - DESCRIPTION DE LA MATIERE -

Les phénoplastes à base de bois, connus plus généralement sous le nom de bois bakéliné, sont composés de feuilles de bois imprégnées, sous vide, de résines puis comprimées fortement entre des plateaux chauffants. En faisant varier l'épaisseur des feuillets et leur orientation, on crée des variétés considérables de produits d'utilisations différentes. Les variétés utilisées pour la fabrication d'engrenages sont formées de feuillets orientés dans toutes les directions, ce qui est un avantage intéressant. On arrive ainsi à donner une isotropie statistique à cette matière dans le plan des feuillets. Les dents de l'engrenage seront toutes de la même dureté, avec la même résistance à la flexion, à la compression et l'état de surface sera sensiblement le même partout.

La variété étudiée pour l'usure est de densité 1,35. On l'a étudiée sous forme de disques d'épaisseur 10 mm.

2 - ENGRENAGES ETUDIES -

Les engrenages en bois bakéliné étant en général de module plus grand que ceux en tissu bakéliné, les modèles d'éprouvettes d'usure utilisés jusqu'alors ne peuvent plus servir. On a donc calculé un nouveau couple d'engrenages et, à chaque point de contact intéressant, on lui a fait correspondre une paire de galets. On s'est arrangé de façon que la partie utile de la ligne d'action du couple d'engrenages ait près de 70 mm de longueur, ce qui est le maximum d'entraxe possible sur la machine "Amsler".

On a pris l'angle de pression de 20° , le rapport des vitesses étant de 1,1, on a :

$$IO_2 = 110 \text{ mm} \quad IO_1 = 100 \text{ mm} \quad (\text{fig. 48})$$

$$T_1 T_2 = 71,8 \text{ mm}$$

$$\text{D'où :} \quad T_1 I = 34,2 \text{ mm} \quad T_2 I = 37,6 \text{ mm}$$

On a pris comme nombre de dents :

$$n_1 = 20 \quad n_2 = 22$$

D'où le module :

$$\frac{220}{22} = \frac{200}{20} = 10$$

Le point de roulement avec glissement qui nous intéresse est le point A. On calcule aisément les rayons des galets correspondant à ce point : $T_1 A = 58 \text{ mm}$ $T_2 A = 15 \text{ mm}$.

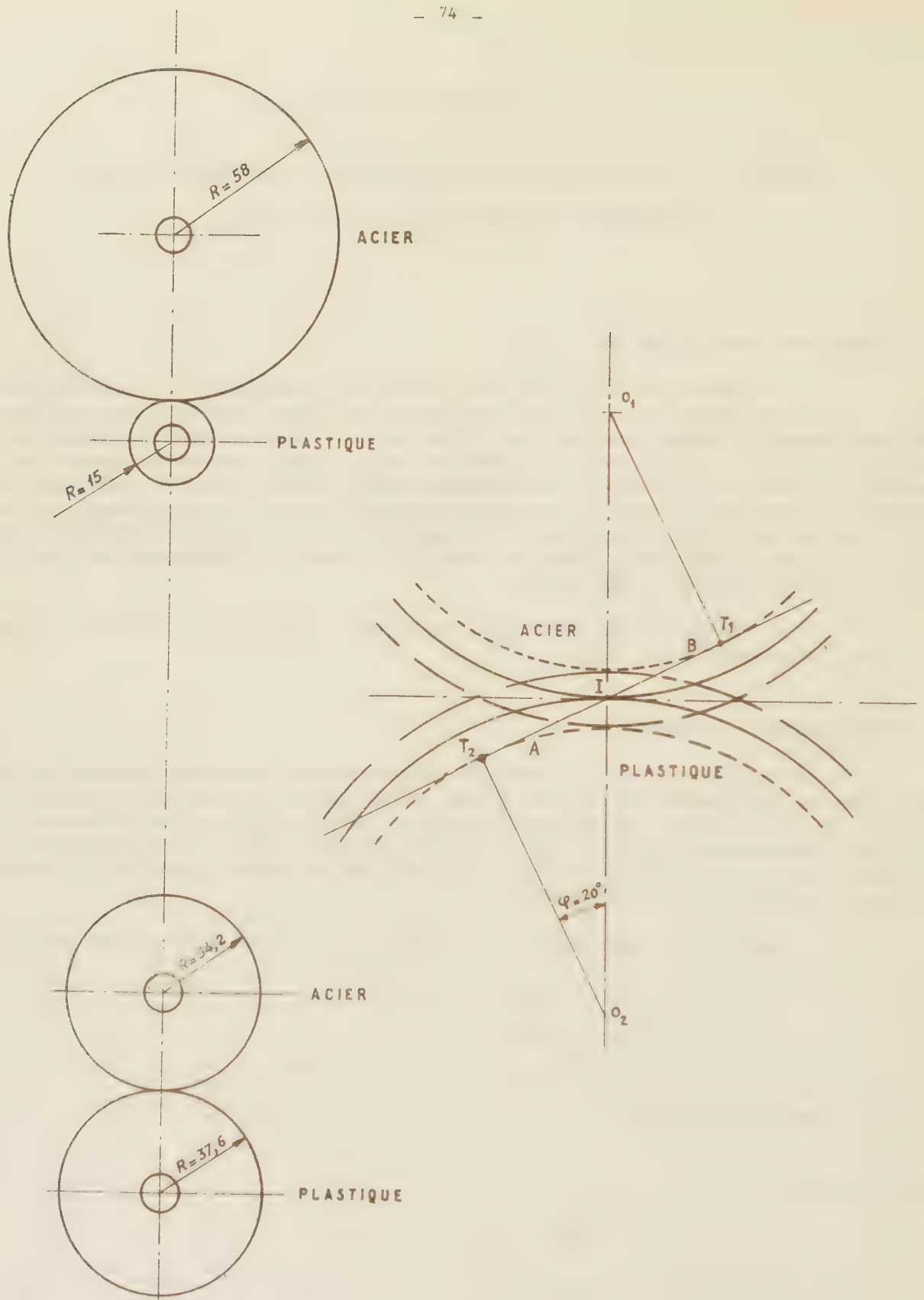


Fig . 48

La différence des rayons de courbure étant plus accentuée dans ce cas que dans le premier, le glissement sera plus fort.

On a obtenu finalement deux couples de galets à étudier qui seront les suivants

a) - Roulement avec glissement (Point A)

Un galet de diamètre 15 mm, en bois bakélinisé .

Un galet de diamètre 116 mm, en acier doux.

b) - Roulement sans glissement (Point I)

Un galet de diamètre 75,2 mm, en bois bakélinisé

Un galet de diamètre 68 mm, en acier doux.

On réalise ainsi les conditions extrêmes de fonctionnement d'un engrenage en bois bakélinisé de 22 dents roulant sur un pignon de 20 dents en acier.

On a pris bien soin de roder les galets en acier avant de les faire travailler, de façon à avoir un état de surface convenable analogue à celui des galets étudiés pendant leur travail sur des galets en plastique à base de toile.

3 - ESSAIS DE ROULEMENT AVEC GLISSEMENT -

Les deux galets de la figure 48 représentant le point A ont été placés sur leurs axes respectifs de la machine "Amsler". L'entraxe étant très grand, la disposition de la machine empêchait le serrage du ressort donnant la pression entre les deux galets. Il a donc fallu faire un petit montage supplémentaire et mettre des poids sur le bâti mobile de la machine supportant l'axe supérieur (voir figures 8 et 9). Le bac de graissage a été élargi et placé sous le galet inférieur.

a - Courbes obtenues

Les essais effectués ont donné le réseau de courbes de la figure 49. Les courbes sont rectilignes d'abord puis, leur pente va en croissant jusqu'à stabilisation. La charge d'endurance limite dans ce cas est de 4 kg/mm.

b - Comparaison avec les autres matériaux utilisés précédemment.

Si nous comparons ce réseau de courbes aux réseaux semblables des figures 35 et 45, pris tous les deux dans le cas de roulement avec glissement, nous remarquons que ces courbes ont toutes la même allure, ce qui indique bien la généralité du phénomène. Les chiffres d'usure varient avec les conditions de l'essai mais le changement qualitatif de l'usure se produit chaque fois avec suffisamment de netteté pour pouvoir être décelable. La charge d'endurance limite est du même ordre de grandeur que dans les autres cas. Notons, cependant, que la pente des courbes est moins accentuée pour les fortes charges dans le cas du bois bakélinisé; l'usure semble un peu moins forte. Il ne faut cependant pas oublier que nous sommes dans un cas de vitesse de glissement plus grande que pour les stratifiés à base de tissu; le film d'huile doit donc être normalement plus épais et ceci contribue à la diminution de l'usure. On peut donc dire que la résistance à l'usure est sensiblement la même dans ce cas comme dans les autres.

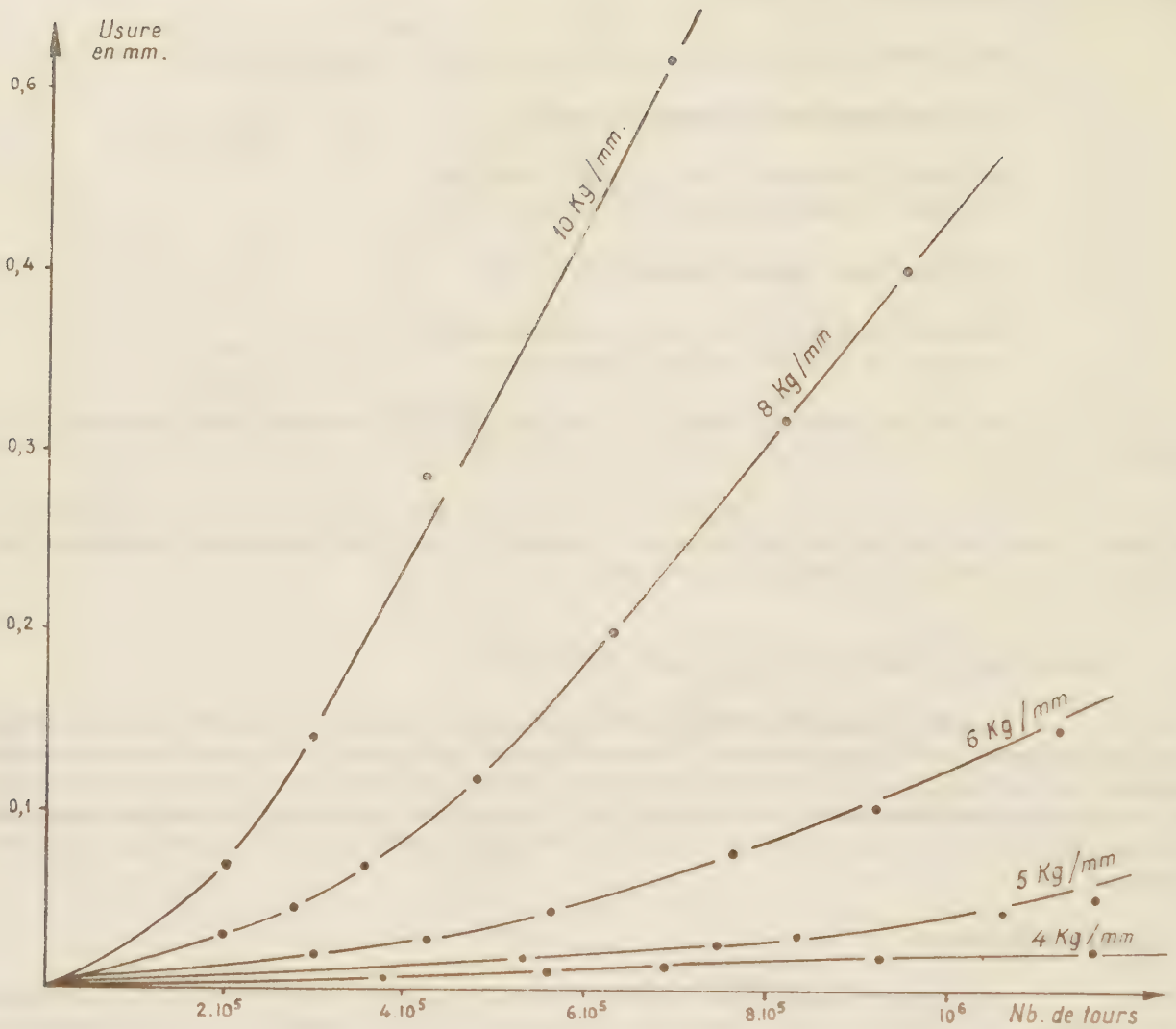


Fig. 49

4 - ESSAIS DE ROULEMENT SANS GLISSEMENT

Les essais de roulement pur nous ont donné les courbes de la figure 50. Ces courbes là présentent également une certaine diminution de l'usure quand on les compare aux autres courbes semblables des figures 42 et 47. La charge d'endurance limite reste de 3 kg/mm. L'allure des courbes est la même car le phénomène se produit selon des lois identiques.

Nous devons noter, dans ces cas de roulement sans glissement, que l'effet perturbateur de l'huile sur la répartition des contraintes dans les galets est beaucoup plus faible. L'absence de glissement élimine totalement le film d'huile et la théorie de Hertz s'applique intégralement. Nous pouvons donc appliquer les formules de Hertz dans tous les cas envisagés.

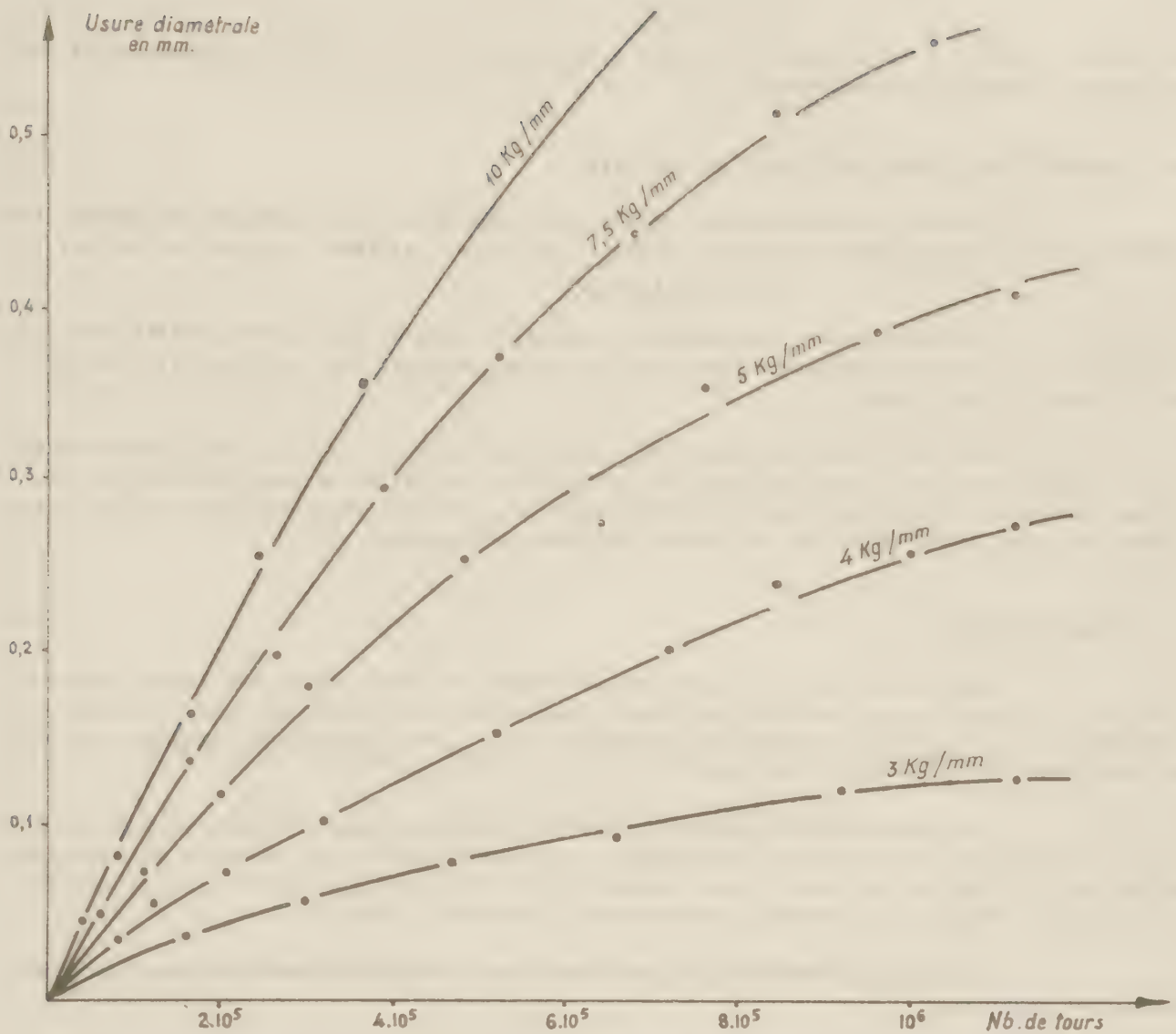


Fig. 50

a - Stratifiés à base de tissu de coton

Dans les deux cas, le module d'élasticité est de l'ordre de 460 kg/mm²; les galets adoptés ont eu pour rayons : 21,5 et 23,5 mm; le galet en acier est supposé avoir un module d'élasticité de 22.000.

En appliquant les formules :

$$\gamma = 0,59 \sqrt{\frac{PE}{r}}$$

avec :

$$\frac{2}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

et :

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

On obtient : $\sigma = 6,3 \text{ kg/mm}^2$ comme contrainte à la surface pour une charge appliquée de 3 kg/mm qui est la charge d'endurance limite.

b - Stratifiés à base de feuilles de bois -

Le module d'élasticité est sensiblement plus élevé: de l'ordre de 840 kg/mm^2 ; les galets utilisés sont de rayons $34,2$ et $37,6 \text{ mm}$. En appliquant les mêmes formules, on obtient :

$$\sigma = 6,8 \text{ Kg/mm}^2$$

La contrainte est légèrement plus élevée à cause du module d'élasticité. Celui-ci étant plus fort, la surface d'écrasement entre les deux galets est plus faible et la pression qui y règne est plus élevée.

Cependant, pour la charge 3 kg qui nous intéresse en tant que charge d'endurance limite, nous notons que les usures sont plus faibles pour les résines à base de bois. Cela s'explique également; le module d'élasticité étant plus fort, les déformations locales dûes à cette contrainte sont plus faibles d'où meilleure résistance de la pièce.

5 - CONCLUSION

Cette étude des trois matériaux principaux utilisés pour la fabrication des engrenages plastiques nous a permis de nous rendre compte de leurs caractéristiques et de leur résistance à l'usure. Il est cependant assez difficile, s'il faut formuler un jugement de valeur de dire lequel des trois est le meilleur.

Tous ces matériaux obéissent aux mêmes lois élastiques, décrites au Chapitre III. Leurs résistances à l'usure ne sont pas beaucoup différentes entre elles. Elles le sont d'autant moins que l'utilisation des coefficients de sécurité en résistance des matériaux rend sans importance des différences de charges d'endurance de l'ordre de 1 kg/mm .

En fait, ces matériaux ont des champ d'application différents suivant les dimensions des engrenages.

Les deux stratifiés à base de toile sont tout indiqués pour les engrenages de petites et moyennes dimensions à cause des mailles de tissu de petites dimensions qu'ils possèdent et qui les rendent homogènes à l'échelle des petites dentures. Le stratifié à base de bois sert par contre pour les engrenages plus gros. Son prix de revient, relativement plus faible que les deux autres, permet également son utilisation à meilleur compte.

. C .

ETUDE DES CONDITIONS DE CONTACT
DES DENTURES

CHAPITRE IX -

ETUDE DE L'ETAT DE SURFACE DES DENTURES

1 - IMPORTANCE DE CETTE ETUDE -

L'étude de l'état de surface des dentures d'engrenages en plastique, ou bien, celle des galets qui leur correspondent, présente une importance primordiale. Il a toujours été constaté que la surface des dentures subissait une évolution profonde pendant la durée de fonctionnement d'un engrenage. Cette évolution est encore plus marquée avec des matériaux hétérogènes comme les stratifiés où les différences entre les propriétés des matériaux assemblés se retrouvent sur la surface. De plus, les plastiques étudiés étant anisotropes, on obtient des états de surface ayant des directions privilégiées dont il importe de tenir compte. L'ensemble de ces facteurs fait que l'état de surface des plastiques est très mal défini et il est important de le connaître convenablement par une méthode appropriée.

2 - DIFFERENTES METHODES D'UTILISATION -

Deux procédés de mesure de l'état de surface ont été utilisés : l'un, électromécanique et l'autre, optique.

a - Profilomètre "Brush"

Dans cet appareil, la surface à mesurer est posée horizontalement; un stylet s'appuie dessus et se déplace. Les irrégularités de la surface le font bouger et ceci est transformé en impulsions électriques par l'intermédiaire d'un cristal de quartz. Les vibrations électriques amplifiées sont enregistrées sur une bande (Figure 51)

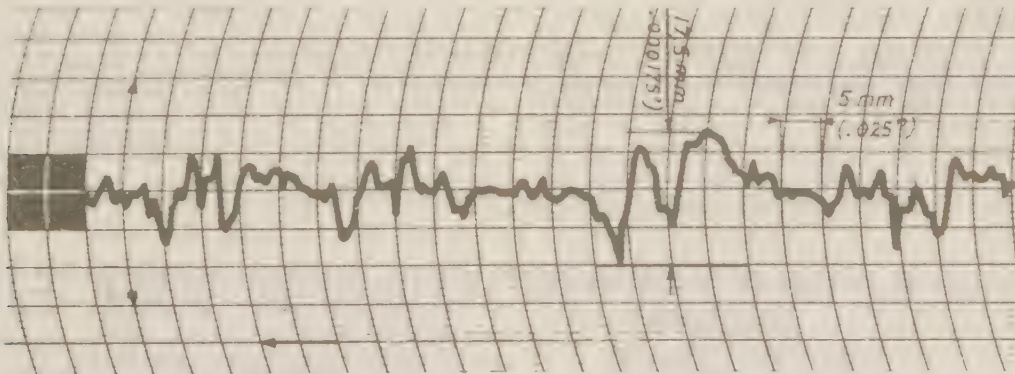


Fig. 51

De nombreux essais effectués avec cet appareil nous ont donné dans chaque cas, des valeurs de l'état de surface. Cependant, son utilisation n'a pas été généralisée car il ne nous donne pas une idée d'ensemble de la surface. On voit ce qui se passe en un point (Fig.

52) mais non pas partout.

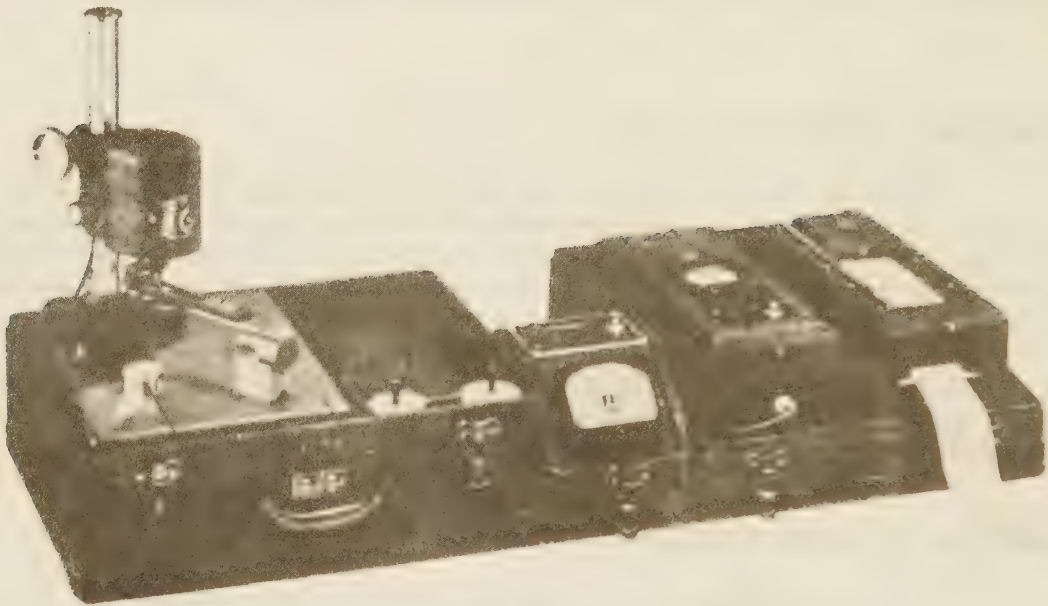


Fig. 52

b - Système des ombres portées

Le système des ombres portées est beaucoup plus intéressant. Il consiste à éclairer les surfaces à étudier sous une incidence lumineuse rasante. Il se forme une série d'ombres très longues qu'il suffit d'observer au microscope pour avoir une idée très nette de la hauteur des aspérités sur la surface.

La mesure de la hauteur des aspérités se fait en mesurant la longueur de l'ombre. Cependant, il reste un problème d'étalonnage assez délicat. Il se résout de deux façons :

- Par l'emploi du microscope d'Arnulf, dans lequel on met au point la base d'une aspérité puis son sommet. La différence des mises au point est mesurée sur un bouton moletté gradué en microns.
- Par l'emploi d'un étalon de très petites dimensions qui est un fil de cuivre très mince. Celui-ci, dont on connaît le diamètre, est posé sur la surface à étudier. La lumière incidente lui fait une ombre. On peut mesurer les hauteurs des aspérités en comparant leurs ombres à celle du fil (Figure 53). C'est ce dernier procédé qui a été utilisé car il permet d'obtenir un document photographique complet comprenant les aspérités et l'étalon. L'éclairage a été obtenu à l'aide d'une lampe à filament ponctuel, orientable à volonté.



Fig. 53

Les photos ont nécessité un très long temps de pose, les matières plastiques de couleur brun foncé donnant une faible luminosité sur la plaque sensible. On a obtenu les résultats qui suivent dans le cas du roulement avec glissement.

3 - ETAT DE SURFACE DES GALETS EN STRATIFIES "P 44 CLASSE 2"

L'état de surface des galets en cette matière a été suivi pendant les essais d'usure étudiés dans les chapitres précédents de façon à étudier son évolution, surtout au moment où l'usure change de caractère.

a - Avant l'usure (Figure 54)

La surface est unie; on y observe les sillons de tour faits pendant l'usinage. L'étalon de droite est un fil de cuivre de 0,199 mm de diamètre. De la mesure de son ombre, on déduit la hauteur des aspérités qui n'excède pas 0,01 mm.

b - Après 400 000 tours , sous charge de 6 kg/mm - (Figure 55)

La surface est beaucoup plus rugueuse. L'étalon de droite est de 0,077 mm de hauteur. Les aspérités sont au maximum de 0,03 mm (en ne tenant pas compte de la grosse aspérité située en bas).

c - Après 10^6 tours, charge 6 kg/mm - (Figures 56 et 57)

L'étalon est toujours de 0,077 mm. Les aspérités sont de loin plus grosses: la surface a changé totalement d'aspect. Les aspérités sont de l'ordre de 0,07 mm, donc beaucoup plus fortes.

Le changement qualitatif de l'usure, que nous avons mis en relief par les courbes de la figure 35, se retrouve ici.

Au changement de pente qu'on remarquait, correspondent des aspérités en plus grand nombre et plus hautes.

Il nous sera possible, par conséquent, de déterminer le degré d'usure d'une surface du même matériau en prenant une photo de ces aspérités et en comparant cette photo à celles que nous avons obtenues.

La détermination du stade auquel est arrivée l'usure est donc possible.

4 - ETAT DE SURFACE DES GALETS EN STRATIFIES "P 44 CLASSE 1"

Une étude analogue à celle du cas précédent a été faite :

a - Après un très faible rôdage (Figure 58)

On distingue nettement le tissu entre les couches de plastique. Quelques filaments de coton ressortent, mais pas d'aspérités de plus de 0,01 mm (étalon 0,077 mm).



Fig. 54



Fig. 55



Fig. 56



Fig. 57



Fig. 58



Fig. 59

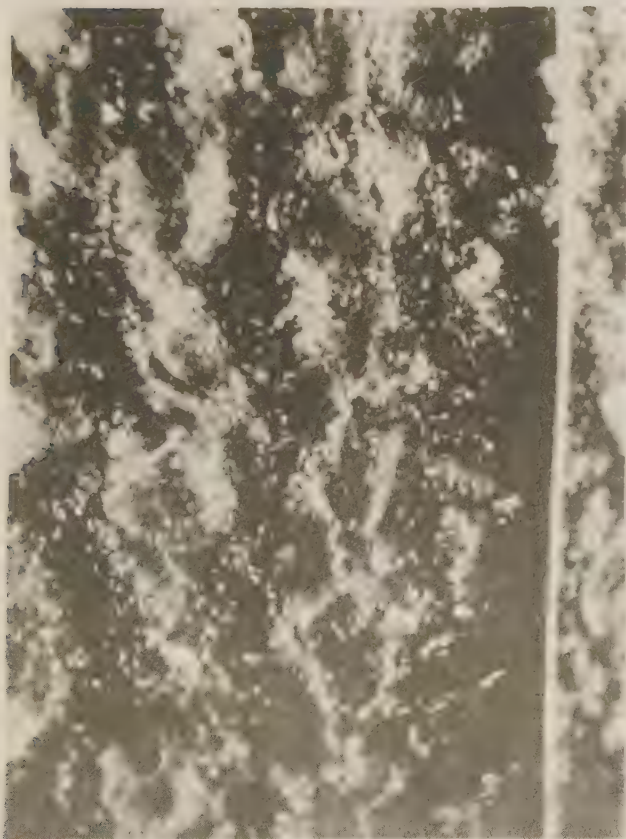


Fig. 60



Fig. 61

b - Après 440 000 tours, charge 5 kg/mm (Figure 59)

Surface beaucoup plus tourmentée; aspérités de l'ordre de 0,05 mm, les filaments de coton commencent à sortir.

c - Après 600 000 tours, charge 5 kg/mm (Figure 60).

La surface a changé complètement d'aspect; on ne distingue plus les couches de tissu du reste du plastique; aspérités de 0,08 mm et petites crevasses vers le haut.

d - Après 600 000 tours, charge 10 kg/mm (Figure 61)

Les crevasses sont beaucoup plus larges et tendent à écarter entre elles les couches de tissu (au milieu de la photo). Les aspérités atteignent 0,1 mm.

Le changement qualitatif d'usure se manifeste dans ce cas là également par une augmentation de hauteur des aspérités et par l'apparition de crevasses. Le nombre de couches de tissu par mm d'épaisseur était plus faible; le matériau est moins compact, il se disjoint plus aisément sous l'effet de fortes charges.

5 - ETAT DE SURFACE DE GALETS A STRATIFICATIONS DE BOIS -

Les galets à stratifications de bois se sont avérés avoir un excellent état de surface après usure, même lorsque celle-ci était forte.

a - Avant usure (Figure 62)

Les sillons de l'outil de tour sont nettement visibles, de l'ordre de 0,01 mm; quelques aspérités de l'ordre de 0,04 mm très dispersées.

b - Après 400 000 tours, charge 6 kg/mm (Figure 63)

Les sillons du tour se sont complètement aplanis; la raie blanche du milieu est la coupe d'une feuille de bois; pas d'aspérités mesurables

Pour des nombres de tours supérieurs à 600 000, l'état de surface ne change pas sensiblement; pas d'aspérités restant visibles.

Le changement qualitatif de l'usure est donc beaucoup plus difficile à discerner dans ce cas.

6 - COMPARAISON DES DIFFERENTS ETATS DE SURFACE.

Cette étude nous montre que ce sont les galets à base de bois qui ont un état de surface supérieur aux autres. Cependant, comme on ne peut tailler d'engrenages en cette matière qu'à partir d'un module assez grand (supérieur à 2,5), il faudra avoir recours aux autres matériaux pour des pignons plus petits.

Il faut noter également qu'à dimensions égales, le couple de frottement est nettement plus faible pour ces galets que pour les galets à base de toile. Il est de 2 cm/kg

pour les stratifiés à base de bois et de 3 cm/kg pour les autres matières.

Nous pouvons analyser le mécanisme de transformation des surfaces dans les deux catégories de stratifiés.

Les phénols formaldéhydes, bien que thermo-durcissables, ont la propriété de se ramollir à des températures de l'ordre de 120 à 150°. Le frottement des galets amenant un échauffement local des pièces, la résine aura donc tendance à s'en aller la première.

Dans le cas où la stratification est un tissu fait de fibres de coton torsadées, celles-ci émergeront et formeront ces aspérités visibles au microscope.

Dans le cas de stratifications de fibres de bois faiblement liées entre elles, celles-ci se courberont dans le sens de la rotation de la surface et lui donneront cette apparence de poli qu'on y remarque.



Fig. 62

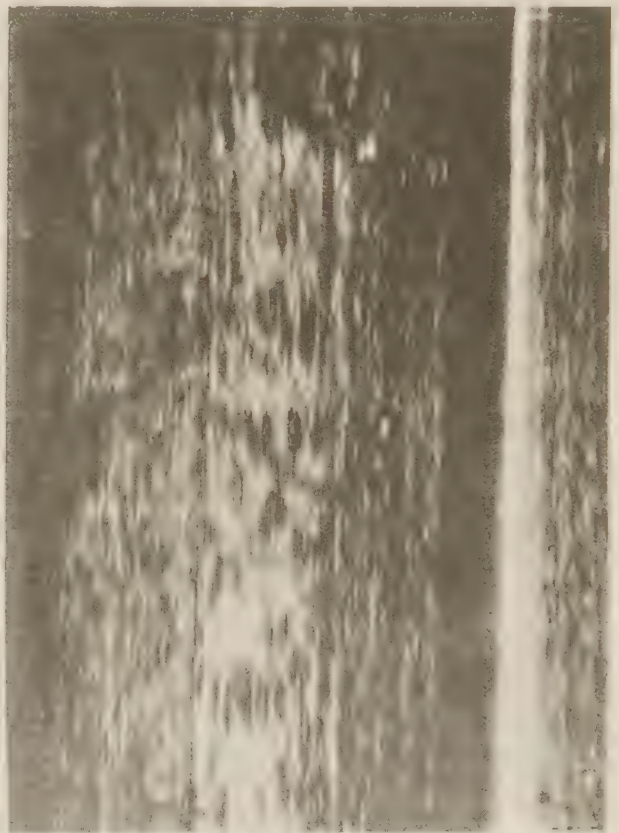


Fig. 63

- CHAPITRE X -

LE PROBLEME DU LUBRIFIANT

I - IMPORTANCE DE CE PROBLEME -

Les dentures d'engrenages étant soumises à de forts glissements et à de grandes pressions superficielles, le problème du lubrifiant se pose avec beaucoup d'acuité pour chaque étude de denture.

a - Pressions superficielles -

Les valeurs de la pression superficielle varient suivant le point d'engrènement où l'on se trouve pour deux profils conjugués. La vitesse de glissement également dépend de ce point. On a fait le produit de la pression superficielle par la vitesse de glissement. On porte ce chiffre en ordonnée, avec en abscisse la longueur AB de la ligne d'action (voir figure 32) on obtient la figure 64 qui représente ce qui se passe pour deux dentures fonctionnant à sec.

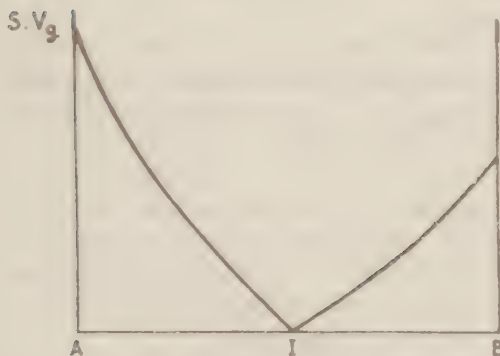


Fig.64

On voit qu'aux extrémités des dentures, la température augmente. Cependant, comme la mise en charge est progressive, le rapport de conduite étant supérieur à l'unité, l'élévation de température n'est pas excessive. Il est cependant nécessaire d'empêcher le contact des deux matériaux composant la denture pour éviter les arrachements ou, éventuellement, les soudures dans le cas d'engrenages métalliques. Il faut donc un film d'huile dont l'épaisseur est égale aux bosses microscopiques de la surface des dentures. Le coefficient de frottement est abaissé par l'emploi d'une huile efficace; le dégagement de chaleur est plus faible et le rendement s'en trouve amélioré.

Le lubrifiant a également une autre fonction: lorsqu'il est en grande quantité, il absorbe la chaleur dégagée et évite les échauffements anormaux des dentures.

b - Différents facteurs intervenant dans la lubrification -

Pour pouvoir choisir une huile dans un problème de graissage de pignons, il faut tenir compte d'un certain nombre de facteurs qui peuvent intervenir : type d'engrenages, vitesse de rotation, charge, température d'utilisation, mode de lubrification, contamination par l'eau, etc...

- Pour les engrenages droits, le film d'huile se forme assez facilement. Il faut cependant que l'huile ait une certaine viscosité, sans exagération, pour éviter une résistance interne trop forte.

- Plus les engrenages sont lents, plus la viscosité de l'huile doit être forte

de façon à pouvoir former le film sans trop de difficultés.

- Pour les engrenages fortement chargés, il faudra évidemment une huile plus visqueuse car la pression de contact devient très forte. Pour une charge trop forte, il n'y aura plus de film quelle que soit la vitesse ou la viscosité.

- La température de fonctionnement sera importante car c'est d'elle que dépend la viscosité du lubrifiant. Plus la température monte et plus le film d'huile sera instable.

- La lubrification par injection dans les dentures est celle qui favorise le plus fortement la formation du film d'huile. Le barbotage est moins bon car avec les roues de grandes dimensions, à faibles vitesses, l'huile ne parvient pas à la zone d'engrènement.

- L'eau a une grande influence perturbatrice. En contact avec l'huile, elle donne une émulsion empêchant le film de se former et oxydant les organes. Il faut éviter la présence d'eau dans les carters d'engrenages.

c - Caractéristiques d'une bonne huile

Une bonne huile de graissage doit être assez visqueuse pour créer le film d'huile elle doit avoir une haute stabilité chimique, ne pas former d'émulsion avec l'eau. Parfois, on ajoute à l'huile des éléments d'addition à base de plomb qui s'opposent au grippage des dentures.

2 - CAS DES ENGRENAGES EN MATIERES PLASTIQUES

Les problèmes de lubrification d'engrenages ont été tous étudiés pour le cas de pièces métalliques. Le problème des pignons en matières plastiques n'ont fait l'objet d'aucune recherche particulière. Cette lacune s'explique.

- 1) - par le fait qu'ils sont beaucoup moins nombreux que les engrenages métalliques;
- 2) - parce qu'ils existent très souvent au milieu d'autres pièces métalliques et on les graisse avec l'huile utilisée pour tout l'ensemble.

Par exemple, l'engrenage actionnant l'arbre à cames d'un moteur à explosion est souvent fait en plastique stratifié; il est lubrifié avec l'huile du carter.

Des essais ont été effectués sur d'autres pièces en plastiques subissant des efforts de frottements, comme des coussinets. Ils ont prouvé que le lubrifiant a surtout un rôle de refroidisseur beaucoup plus que d'abaisseur du coefficient de frottement, dans les cas où le film d'huile ne se forme pas..

Il est donc intéressant d'avoir une idée sur le rôle du lubrifiant dans des engrenages en plastique, d'étudier la modification des conditions de contact par suite de l'existence du lubrifiant.

3 - ESSAIS EFFECTUES -

Des essais comparés de lubrifiants ont été effectués de la façon suivante :

- à sec,
- avec de l'eau pure;
- avec de l'huile légère (Gargoil Vectra Light, viscosité 21° Engler à 20° C);
- avec de l'huile soluble (Solvac 1535);
- avec de l'huile lourde (Gargoil Vectra Heavy, viscosité 37° Engler à 20° C)

(Ces dénominations sont toutes normalisées et définissent complètement les huiles).

La pression exercée a été de 5 kg/mm sur des galets de phénoplaste à base de tissu de coton "P 44 Classe 1". On a tracé les courbes d'usure en fonction du nombre de tours. Les résultats obtenus (Figure 65) nous donnent une idée nette de l'influence des différents fluides employés.

a - Dans l'essai à sec, l'usure est très forte; elle s'accompagne d'un échauffement très grand de la pièce qui finit par s'ovaliser sur la machine. Le couple de frottement atteint 18 cm/kg.

b - Avec de l'eau pure, l'usure est moins forte mais reste considérable. Le galet imprégné d'eau a un coefficient de frottement moindre que lorsqu'il est à sec mais ses conditions de travail ne restent pas bonnes. Le couple de frottement atteint 10 cm/kg.

c - Avec de l'huile fluide, l'usure devient notamment plus faible; le film d'huile modérateur n'arrive pas à se former. Le couple de frottement est de 5 cm/kg.

d - Avec de l'huile soluble à 5% dans l'eau, le résultat est meilleur. Le couple de frottement est de 4 cm/kg.

e - Avec de l'huile lourde qui a été employée ordinairement, l'usure prend des proportions normales. Le couple de frottement est aux environs de 2 1/2 cm/kg.

4 - CONCLUSIONS -

Ces essais nous permettent de mettre en relief deux facteurs principaux pour la lubrification : le refroidissement et la viscosité.

Le refroidissement se produisant avec des liquides à bonne conductivité thermique comme l'huile soluble, permet à la température de se maintenir dans une bonne moyenne et cela empêche la détérioration des galets à base de phénoplastes qui, on le sait, ne peuvent supporter les hautes températures.

La viscosité est aussi très importante pour la formation du film d'huile qui permet de répartir les pressions d'une façon plus homogène que par contact direct.

Il est donc très important, dans tous ces phénomènes d'usure de plastique, d'étudier ces deux facteurs et de choisir des lubrifiants permettant la formation du film tout en possédant une bonne conductivité calorifique, condition indispensable pour un bon refroidissement.

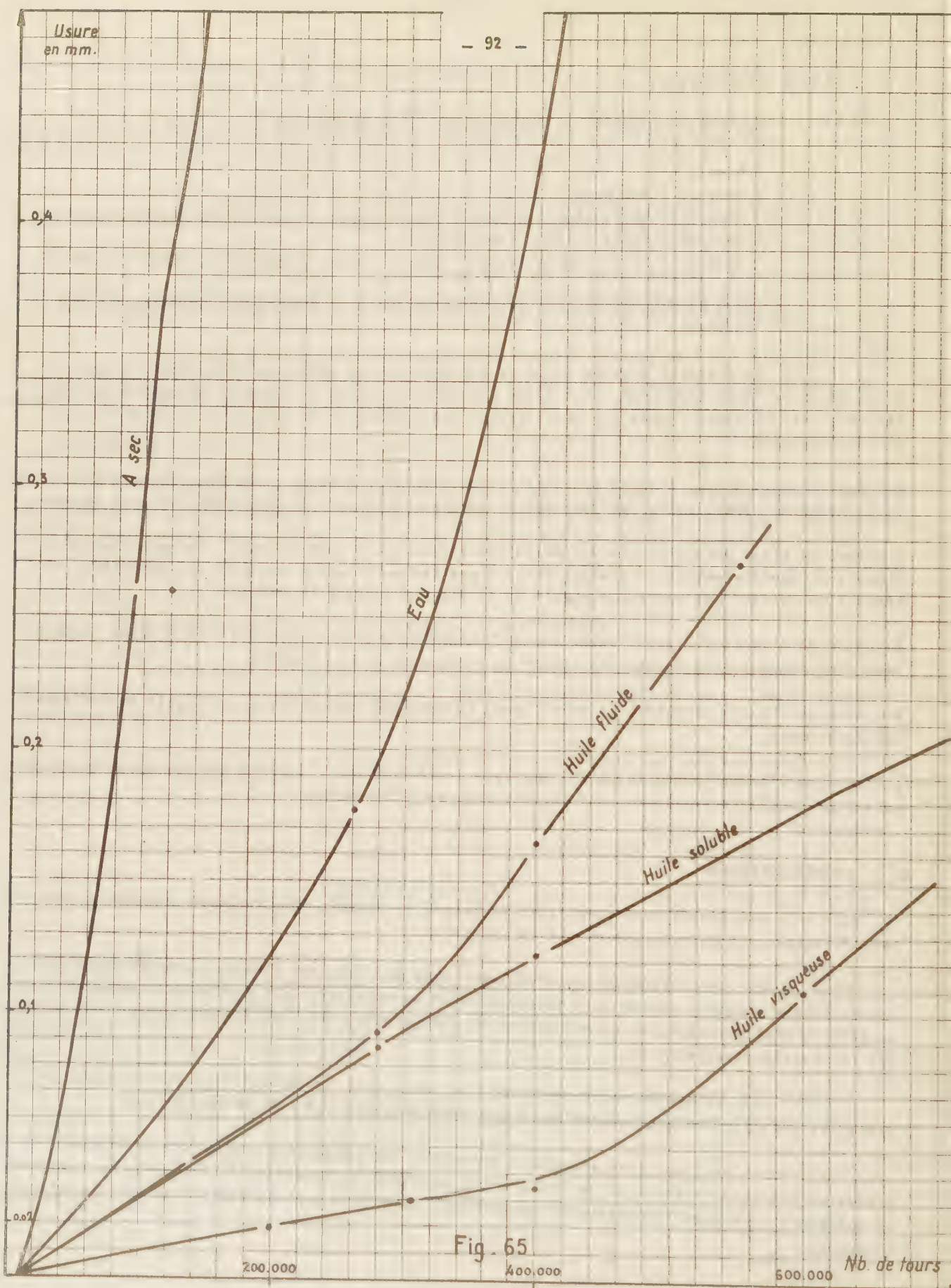


Fig. 65

- CHAPITRE XI -

ETUDE THEORIQUE DES CONTRAINTES AU POINT DE CONTACT

I - BUT DE CETTE ETUDE

Les dispositifs expérimentaux employés nous ont amenés à étudier le contact existant entre les deux galets pressés l'un contre l'autre et animés d'un mouvement de rotation combiné à un glissement. Il est intéressant de savoir ce qui se passe théoriquement entre deux galets, d'étudier les contraintes superficielles au voisinage du point de contact et de se rendre compte ainsi de la mesure dans laquelle la théorie est confirmée par la pratique.

Nous savons que la pression des deux galets l'un sur l'autre nous donne une force radiale sur le galet en plastique. Le glissement donne naissance à une force tangentielle. Le problème théorique qui se pose à nous est donc de savoir quelle est la distribution des contraintes dans un galet soumis en un point à une force radiale et à une force tangentielle.

Après avoir passé en revue l'influence de l'état de surface et celle du lubrifiant cette étude nous donnera une idée de l'état des efforts superficiels dans les dentures d'engrenages. Elle sera suivie par deux vérifications expérimentales : l'une à l'aide de jauges de contraintes, l'autre par photo-élasticité.

2 - SURFACE D'ECRASEMENT DES DENTURES -

Prenons deux galets appuyés l'un contre l'autre avec une pression P par unité de largeur des galets. Sous l'effet de cette pression, les galets s'écrasent légèrement et se touchent suivant un rectangle très allongé ayant pour longueur l'épaisseur e des galets.

a - Valeur de la contrainte d'écrasement.

D'après la théorie de Hertz, la valeur maximum de la pression de contact est :

$$\rho = \sqrt{\frac{P (\rho_1 + \rho_2)}{\pi (K_1 + K_2) \rho_1 \rho_2}}$$

avec ρ_1 et ρ_2 les rayons de courbure des galets.

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} \quad K_2 = \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2}$$

σ_1, σ_2 étant les coefficients de Poisson,

E_1, E_2 les modules d'élasticité des matériaux composant les galets.

Si d est l'entraxe entre les deux galets (figure 32) et φ l'angle de pression on a :

$$\rho_1 + \rho_2 = d \cdot \sin \varphi$$

$$\nu = H \sqrt{\frac{P}{\rho_1 \rho_2}} \quad \text{avec} \quad H = \sqrt{\frac{d \sin \varphi}{\pi (K_1 + K_2)}} \quad (1)$$

En étudiant les variations de ν suivant les points de la ligne d'action, on obtient la courbe suivante (Figure 66)

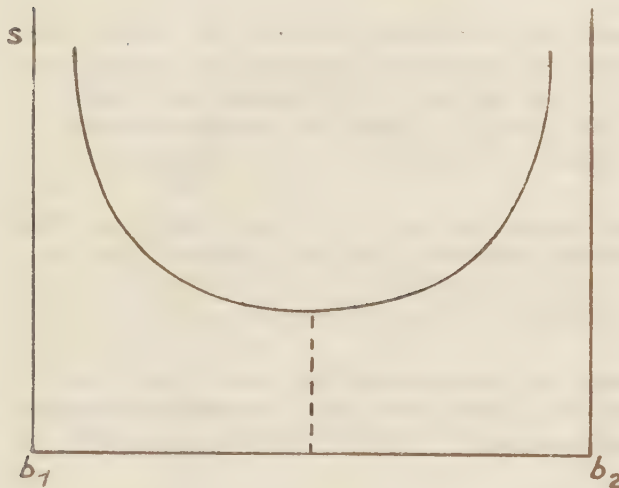


Fig. 66

On voit que la pression spécifique devient très élevée près des cercles de base, d'où l'intérêt d'employer des engrenages avec une partie utile de la ligne d'action ne s'écartant pas trop du point de contact des cercles primitifs. On avait déjà remarqué cette nécessité à propos de la lubrification dans la figure 64.

Le minimum de la courbe des pression figure 66 peut se calculer. Il s'obtient pour un point d'action au milieu du segment $T_1 T_2$ (figure 32); sa valeur est :

$$\nu_m = \frac{2H}{d \sin \varphi} \sqrt{P} \quad (2)$$

En faisant le calcul pour le couple d'engrenages étudié, fait en phénoplaste à base de tissu de coton, on obtient

$$H = 45,1 \quad \nu_m = 7,2 \quad \text{pour } P = 4 \text{ Kg/mm}$$

b - Contrainte d'écrasement sur le cercle primitif -

Il semble plus intéressant de calculer la valeur maximum de la contrainte et non pas sa valeur minimum. Le calcul pratique intéressant se fera, non pas à partir de la formule (2) mais à partir de la formule (1) en prenant pour ρ_1 et ρ_2 les valeurs des rayons de courbure des galets aux points A et B de la figure 32. Le calcul a été fait en partie au chapitre IV. Les essais entrepris par la suite nous ont prouvé que ce n'était pas en ces points que la contrainte était maximum. Le lubrifiant en s'interposant entre les surfaces change la valeur des contraintes. Ces contraintes sont d'ailleurs diminuées pour d'autres raisons : le rapport de conduite est supérieur à l'unité, un dégagement est généralement prévu au sommet des dents, la dent en matière synthétique fléchit et s'oppose à toute charge excessive.

On peut, par contre, calculer cette contrainte au point de contact des cercles primitifs, là où on a trouvé la plus forte usure. Dans la formule (1) on remplace ρ_1 et ρ_2 par $\frac{M n_1}{2} \sin \varphi$ et $\frac{M n_2}{2} \sin \varphi$; n_1 et n_2 étant les nombres de dents. On obtient :

$$\nu_o = \frac{2H}{M \sin \varphi} \sqrt{\frac{P}{n_1 n_2}}$$

ce qui nous donne dans notre cas, pour $P = 4 \text{ kg/mm}$

$$\sigma = \frac{2 \times 45,1}{2,5 \times 0,342} \sqrt{\frac{4}{50 \times 55}} = 4,3 \text{ kg/mm}^2$$

c - Cas des erreurs de dentures -

Dans toute notre étude, nous avons supposé les dents taillées d'une façon parfaite. Cependant, les erreurs de dentures peuvent modifier profondément la répartition des contraintes de Hertz. Le décalage des dents amène des efforts et des flexions supplémentaires. Les erreurs de divisions, plus ou moins périodiques, peuvent amener des surcharges dynamiques importantes si on attèle les engrenages à de grosses inerties.

Remarque

Ces contraintes supplémentaires et imprévisibles sont surtout marquées sur les engrenages métalliques. Dans les engrenages en matières plastiques travaillant en contact avec des pignons métalliques de module d'élasticité beaucoup plus grand, le phénomène est différent. La matière plastique cède aux sollicitations qu'elle subit et les erreurs de taillage se rattrapent peu à peu. C'est d'ailleurs là un des grands avantages qu'ont les engrenages en matières plastiques sur les engrenages métalliques.

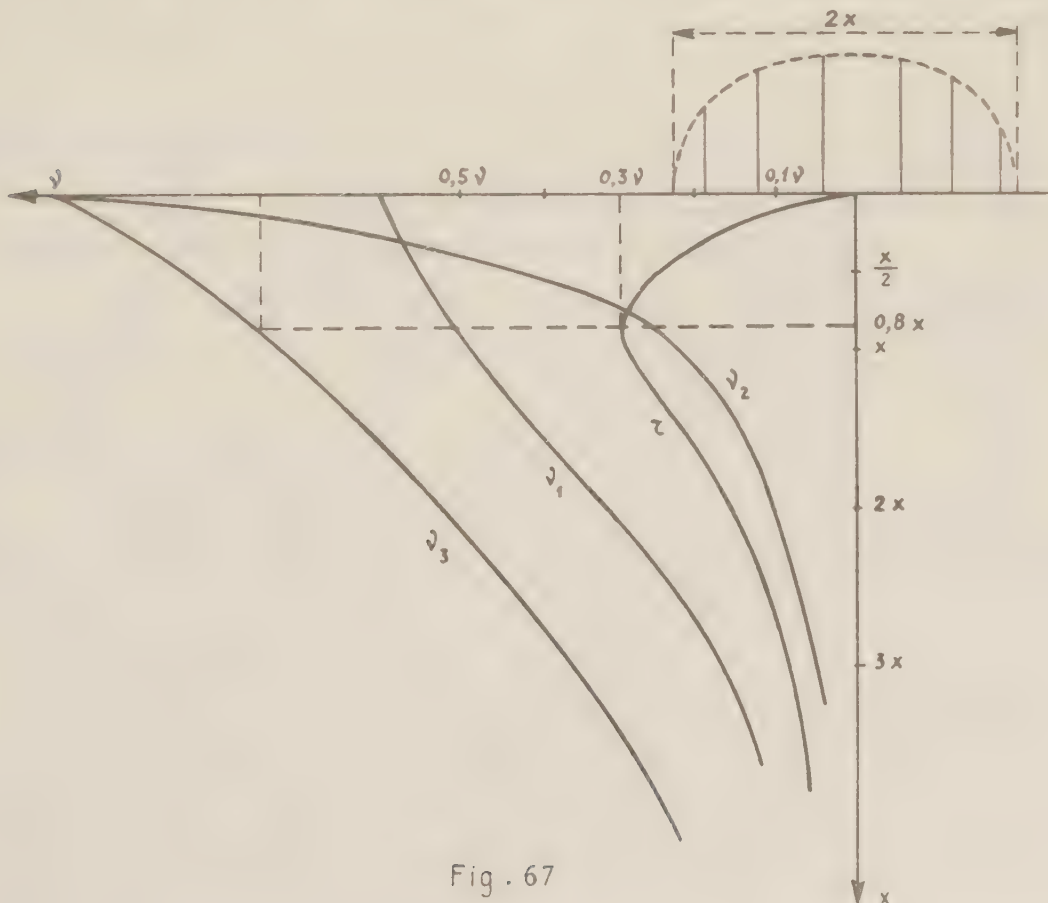


Fig. 67

3 - REPARTITION DES CONTRAINTES DANS LA SOUS COUCHE -

Cette étude a été faite par Belajeff et publiée dans le "Bulletin of the Institute of Ways of Communications (St. Pétersbourg 1917).

Si on étudie les contraintes sur la normale à la surface du centre de la zone de contact, on obtient les valeurs représentées par la *Figure 67*. On y voit les 3 contraintes normales σ_1 , σ_2 , σ_3 le long de OZ . La contrainte de cisaillement nulle en surface atteint la valeur maximum en sous couche à une profondeur égale à la demi-largeur d'écrasement. Ceci a été confirmé expérimentalement par les essais du M.I.T. où des contraintes de cisaillement ont été mises en évidence. En travaillant sur des galets en bakélite, on voyait des bandes sombres apparaître en sous couche, témoignant une élévation importante de la température due au cisaillement.

- CHAPITRE XII -

ETUDE DES CONTRAINTES DE CONTACT PAR LA METHODE DES JAUGES A FIL RESISTANT

I - BUT DE CETTE ETUDE

L'étude théorique des contraintes dans les galets utilisés reste à l'écart de la pratique dans une mesure assez importante. Elle utilise un certain nombre d'approximations. Elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la matière, ni du fait qu'elle est plastique. Elle se base uniquement sur l'élasticité théorique sans se rendre compte que les galets dépassent très souvent la limite élastique dans la zone de contact. Il est donc nécessaire de faire une vérification des résultats donnés par le calcul.

L'utilisation des jauges à fil résistant nous donne un moyen très sur de mesurer les déformations et contraintes en tous les points qui nous intéressent, du galet. Nous trouvons dans ces extensomètres à fil résistant la seule méthode nous donnant directement la valeur des efforts dans le galet.

2 - MONTAGE EFFECTUE -

Un galet en phénoplaste stratifié (P 44 classe 2) de 100 mm de diamètre et de 40 mm d'épaisseur a été placé dans un étrier sous un vérin (*Figure 68*).

Sur la partie cylindrique du cylindre, on a collé, dans un embrèvement, une jauge de contrainte. Une jauge de compensation est collée sur un morceau de plastique placé à côté du galet.

a - Caractéristiques des jauges employées

Marque : jauges S R 4 de la Baldwin Locomotive Works, type C-11

Résistance : 304 ± 2 ohms

Facteur de jauge : $K = 2,84 \pm 2\%$, le facteur de jauge K étant le coefficient de sensibilité du fil résistant.

b - Appareil de mesure

L'appareil utilisé est le pont de Baldwin. C'est un pont de Wheatstone en courant alternatif avec un générateur de 1 000 périodes par seconde. Une résistance variable permet d'équilibrer le pont lorsque la résistance de la jauge varie. A cette résistance correspond un cadran divisé en millionièmes de pouce (une division correspond à une extension de un millionième de pouce, par pouce de longueur). Un milliampèremètre permet de se rendre compte de l'état d'équilibre lorsque l'aiguille est au zéro. L'appareil est alimenté par un accumulateur.

c - Charges appliquées

On applique au galet deux charges .

- La charge radiale est donnée par un vérin à vis serrant le galet entre deux plateaux. Une cellule dynamométrique Richard, posée entre le plateau supérieur et l'étrier, permet de mesurer cette charge à l'aide d'un manomètre gradué en kg. Cette cellule est composée d'un réservoir contenant de l'huile et fermé par en haut par une membrane élastique sur laquelle est posée une bille en acier. La pression sur la bille déforme la membrane, chasse l'huile qui est refoulée dans le manomètre.

- la charge tangentielle est appliquée sous forme d'un couple. On suspend des poids au bout d'une barre qui est fixée au centre du galet. Le galet étant en équilibre, il se crée des forces tangentielles aux points de contact du galet et des plateau .

- Une série de graduations angulaires sur le galet, se déplaçant devant un index fixé à la barre, permet de faire tourner le galet et, par conséquent, de mettre la jauge sur toutes les positions autour du point de contact.

On réalise ainsi les charges existant en un point de la denture d'un engrenage soumis au roulement avec glissement, sous un couple donné.

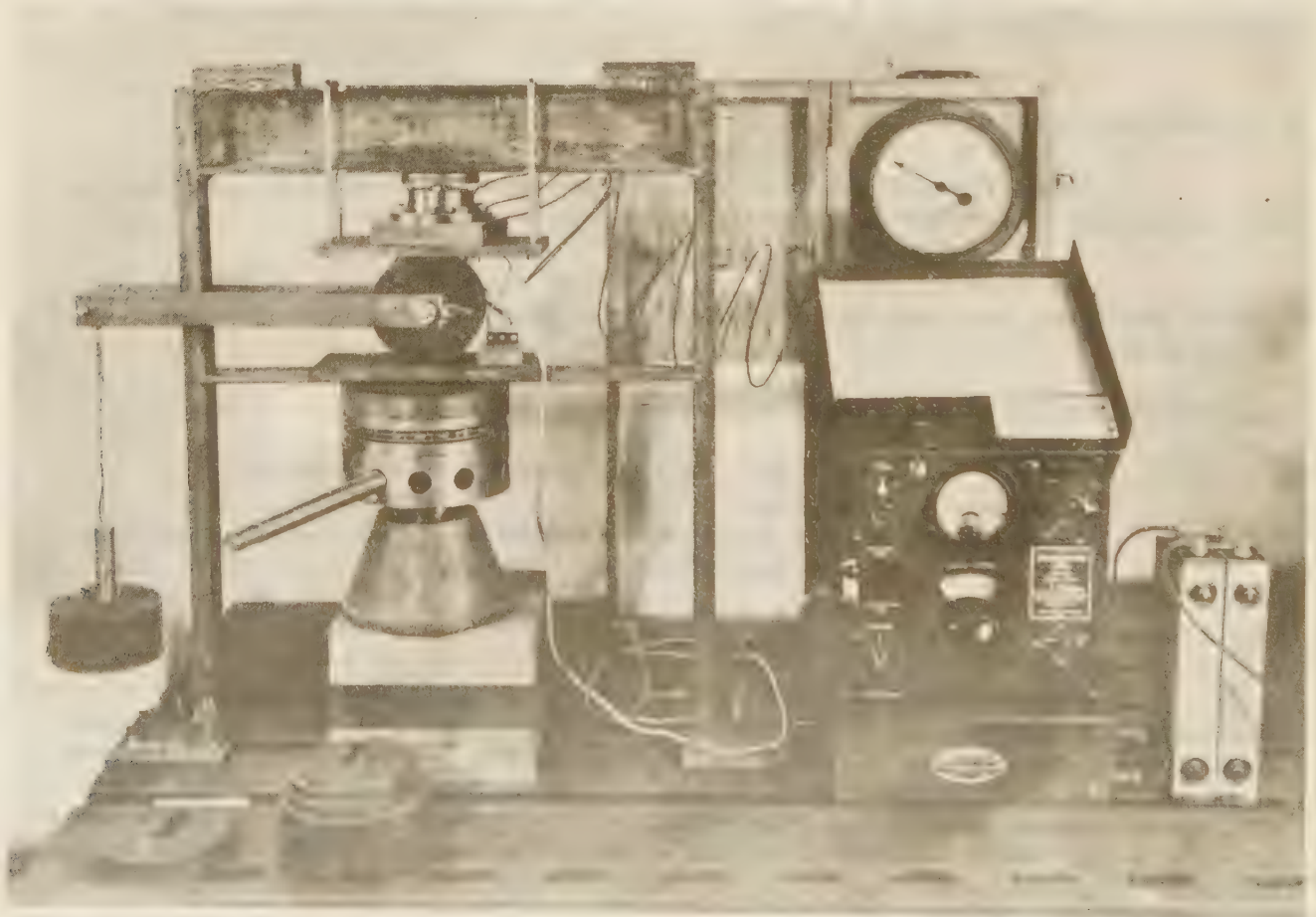


Fig. 68

3 - ETUDE DES ALLONGEMENTS RELATIFS AUX POINTS DE CONTACT DU GALET ET DES PLATEAUX

Dans toute cette étude, on utilise les allongements relatifs de préférence aux contraintes. Pour pouvoir parler de contraintes, il faut multiplier les indications données par l'appareil Baldwin par le module d'élasticité, ceci en supposant l'élasticité parfaite. Or, il est fort possible qu'au point de contact on soit dans la phase plastique; le module d'Young n'a alors plus de sens. Il est plus correct de s'occuper uniquement des allongements relatifs lus directement sur l'appareil de mesure.

a - Cas de la charge tangentielle nulle.

Le premier essai a porté sur le galet auquel on appliquait la charge radiale seule par l'intermédiaire du vérin. On a noté les allongements relatifs en fonction des charges. On s'est placé dans des conditions identiques à celles des galets de la machine "Amstler", c'est-à-dire avec des pressions linéaires variant entre 4 et 10 kg/mm.

En portant sur un graphique les allongements relatifs en fonction des charges appliquées, on a obtenu une série de points alignés (Figure 69). Les contraintes sont donc sensiblement proportionnelles aux charges radiales.

b - Application de la charge tangentielle

On met sur le galet une charge radiale de 10 kg/mm; elle nous donne un allongement relatif de "a". On dispose ensuite sur la tige servant à donner le couple des poids croissants de 1 à 20 kg, de façon à créer une force tangentielle de plus en plus grande. Les chiffres lus alors sur l'appareil sont : b, c, d, e, etc ... Les différences : b-a, c-a, d-a, etc. sont les accroissements de l'allongement relatif dûs à l'addition des charges tangentielles. On porte ces valeurs en ordonnée sur un graphique avec, en abscisse, les charges placées au bout de la tige; on obtient ainsi une droite de pente sensiblement égale à la pente de la droite de la figure 69 (Fig.70)

4 - ETUDE DES ALLONGEMENTS RELATIFS AU VOISINAGE DU POINT DE CONTACT -

Les phénomènes autour du point de contact présentent une grande importance pour nous. La théorie du roulement nous montre la nécessité de connaître les tensions et compressions résultant du mouvement. L'utilisation de la jauge autour du point de contact nous permettra d'étudier ce problème.

a - Cas de la charge radiale seule

On applique au galet une charge radiale unique de 5 kg/mm. On déplace la jauge grâce à l'index d'angles connus, de part et d'autre du point de contact. La jauge passe ainsi de 15° en 15°, par différentes positions, jusqu'à $\pm 45^\circ$. Pour chaque position, on lit les allongements relatifs correspondant à l'application de la charge de 5 kg/mm. On porte sur un graphique, en abscisse les angles et en ordonnée les allongements relatifs. On obtient ainsi la courbe symétrique de la figure 71, marquée 0 kg (de charge tangentielle). Cette courbe nous permet les remarques suivantes :

- elle est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées, comme il fallait s'y attendre.

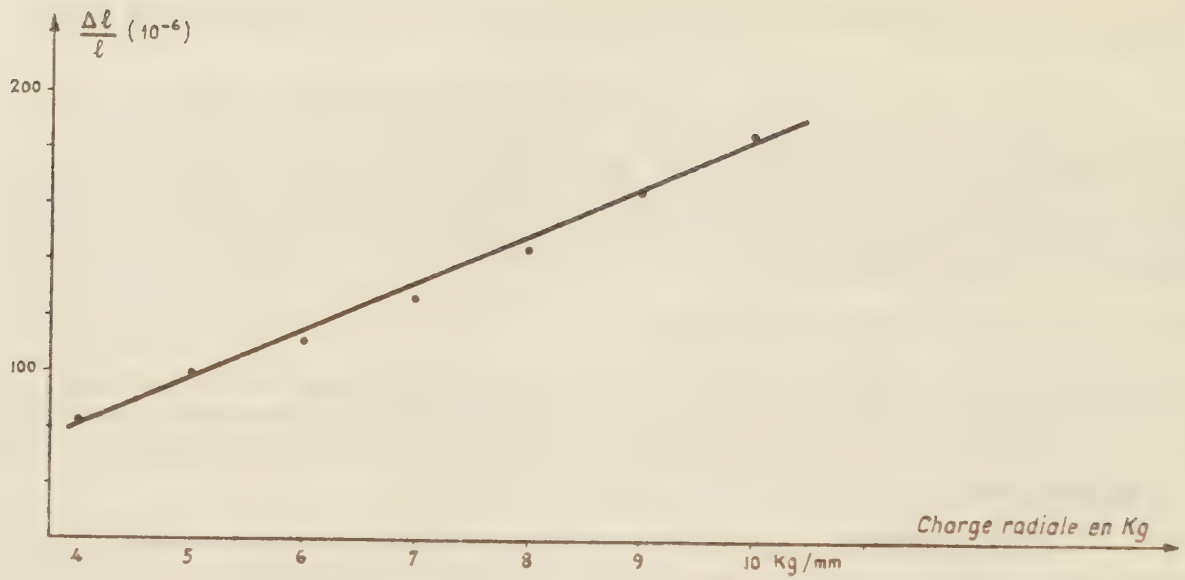


Fig. 69

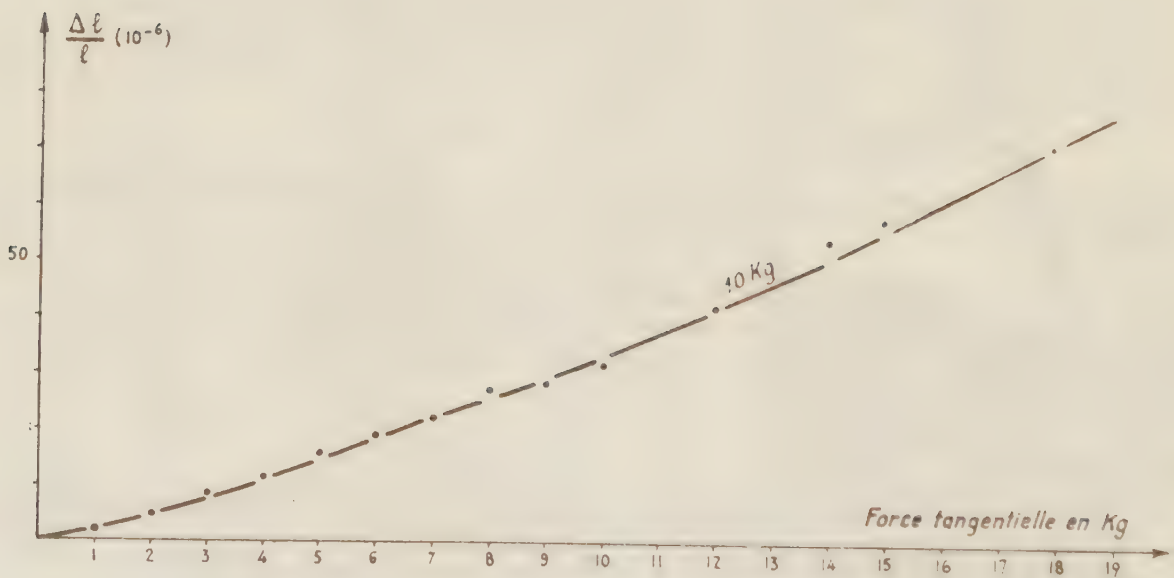


Fig. 70

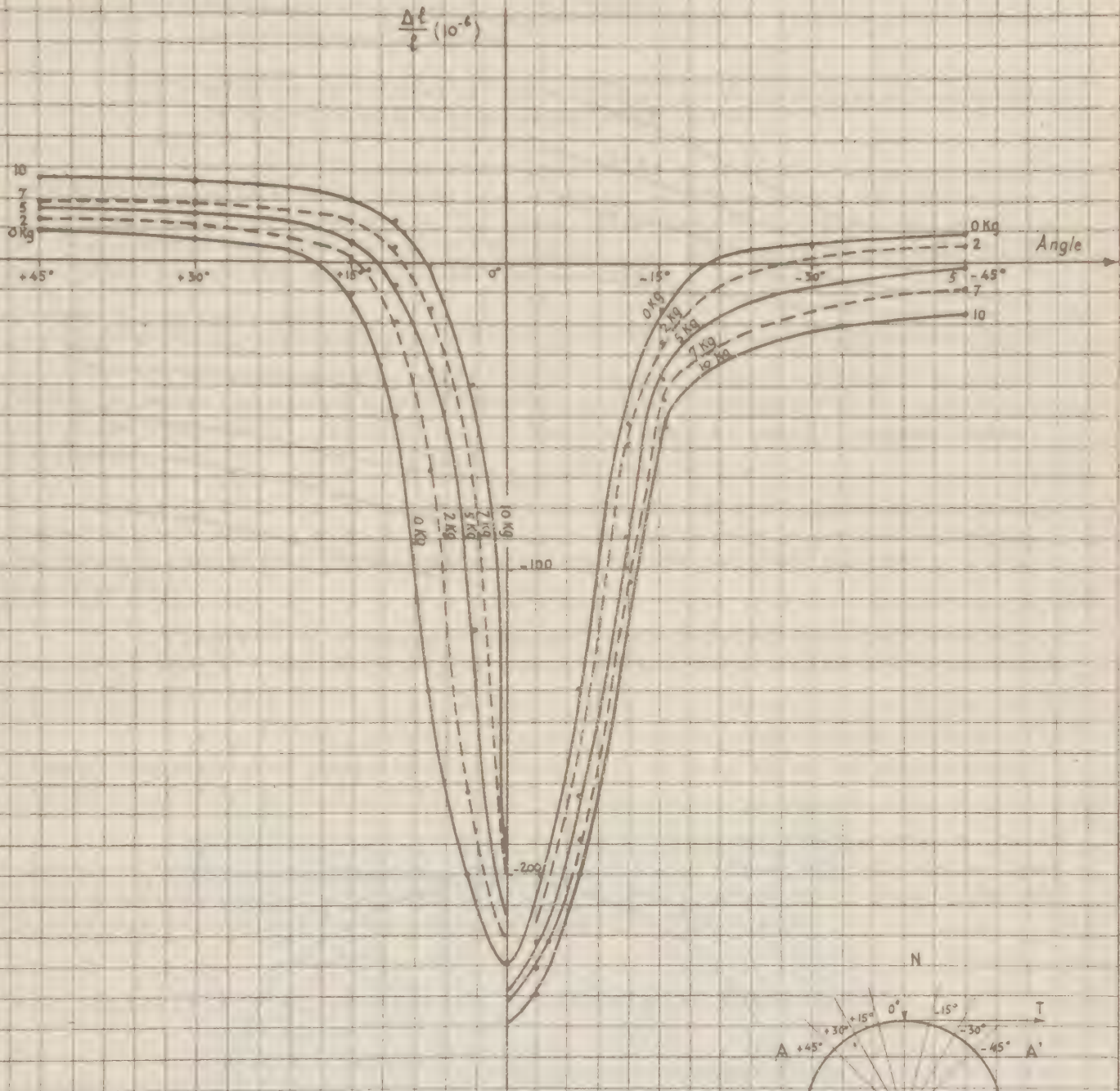


Fig. 71

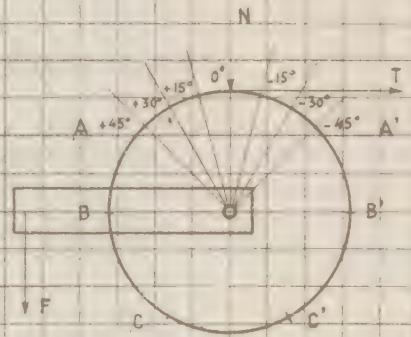


Fig. 71 bis

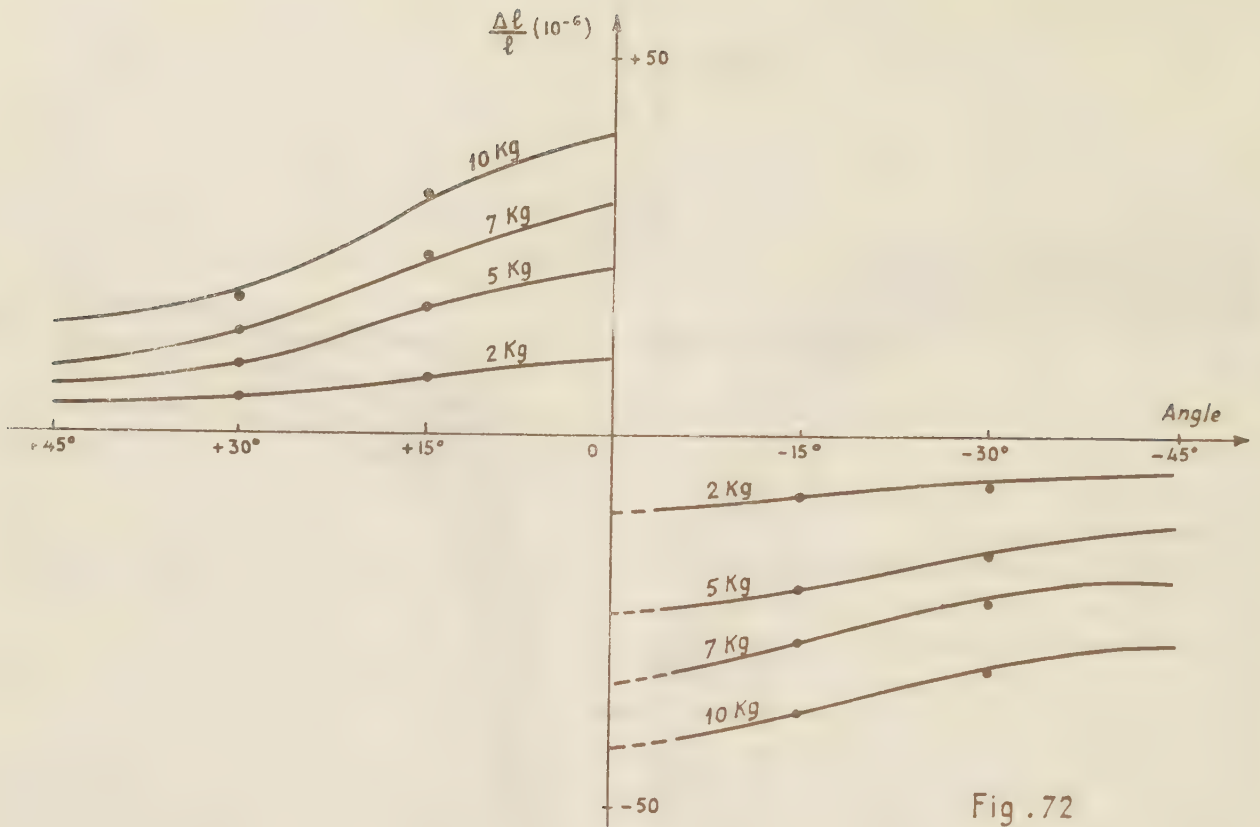


Fig. 72

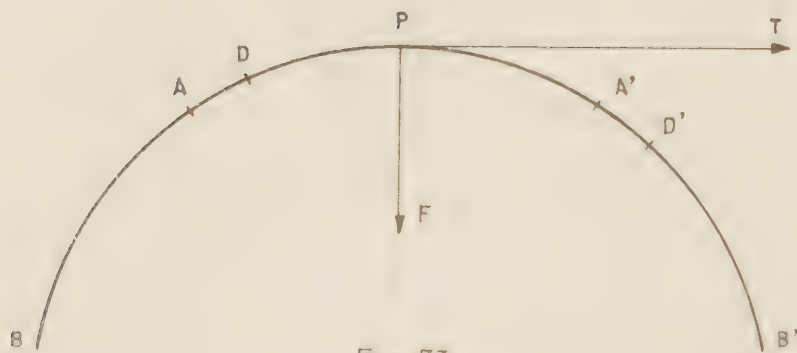


Fig. 73

- Elle comprend deux zones: une zone de compression, très grande, une zone de tension aux deux extrémités.
- Entre les deux régions se trouvent deux points de contraintes nulles, situés à la surface du galet pour des angles de 20° environ.

La raison de cette inversion des contraintes superficielles est assez simple (Figure 71 bis). Le galet étant comprimé verticalement, les fibres superficielles des régions ARC, A'B'C', fléchissent et se tendent. Par contre, autour de la verticale on a une compression, d'où l'existence de deux points d'inversion des tensions qui sont décelés par la jauge. Les tensions sont beaucoup plus faibles que les compressions, ce qui était à prévoir.

b - Cas des charges radiales et tangentielles combinées :

On procède aux mesures de la façon suivante : la jauge est placée à un angle donné; une charge radiale de 5 kg/mm est mise sur le galet, l'allongement relatif est alors "a" des charges tangentielles allant de 1 à 10 kg sont placées sur la tige, l'allongement relatif devient "b".

La différence "b-a" représente l'accroissement de l'allongement dû à la charge tangentielle. Si on porte sur un graphique ces allongements relatifs en fonction de l'angle, on obtient une courbe pour chaque valeur de la charge tangentielle posée qui varie de 2 à 10 kg (Figure 72)

Ce réseau de courbes nous montre que la charge tangentielle a pour effet de créer une tension d'un côté du galet et une compression de l'autre; ces tensions et compression sont du même ordre de grandeur.

Si nous portons maintenant (Figure 71) les allongements réels en fonction de l'angle, pour différentes charges tangentielles de 2, 5, 7, 10 kg, on obtient une série de courbes qui se déplacent de plus en plus vers la droite.

Cela également est explicable; sous l'effet de la force tangentielle, il y a décalage de la zone des tensions et de celle des compressions (Figure 73). À la zone des tensions AB s'ajoute une tension supplémentaire due à la force T, A vient en D. Dans la zone des compressions AA', s'ajoute une autre compression due à T; A' vient en D'.

5 - INSUFFISANCE DE LA METHODE DES JAUGES DE CONTRAINTES

La méthode des jauges de contraintes nous a donné de précieuses indications sur la nature du contact entre deux galets et, par extension, du contact de deux dentures d'engrenage. Cependant, son défaut principal est qu'on ne voit pas d'une façon claire l'état des contraintes au point des contacts, surtout à l'intérieur du galet. Pour ceci, il faudra faire appel à un autre procédé d'investigation: c'est la photo-élasticimétrie qui complète les résultats obtenus par les jauges.

- CHAPITRE XIII -

ETUDE DU CONTACT PAR PHOTOELASTICIMETRIE

1 - BUT DE CETTE ETUDE

Le but principal de cette étude est d'avoir une idée de l'état des contraintes dans le galet, dans la sous couche et sur la périphérie

La méthode des jauges de contrainte nous a indiqué l'existence de deux points de contraintes nulles, de part et d'autre du point de contact. L'utilisation de la photoélasticimétrie nous renseignera sur l'existence à l'intérieur du galet de zones de tensions et de compressions ainsi que sur les lignes neutres les séparant.

La jauge de contrainte avait un défaut principal, celui d'occuper trop de place sur le galet et, par conséquent de ne pas nous donner la valeur des contraintes ponctuelles; la photoélasticimétrie nous permettra une meilleure représentation de la distribution des efforts.

2 - MAQUETTE REALISEE

L'appareil optique utilisé est le photoélasticimètre "Kammerer". Un galet en Plexiglass a été monté dans un étrier (Figure 74) entre deux plans faits de la même matière. Une vis sert à le comprimer et à donner l'effort radial une cellule Richard interposée entre

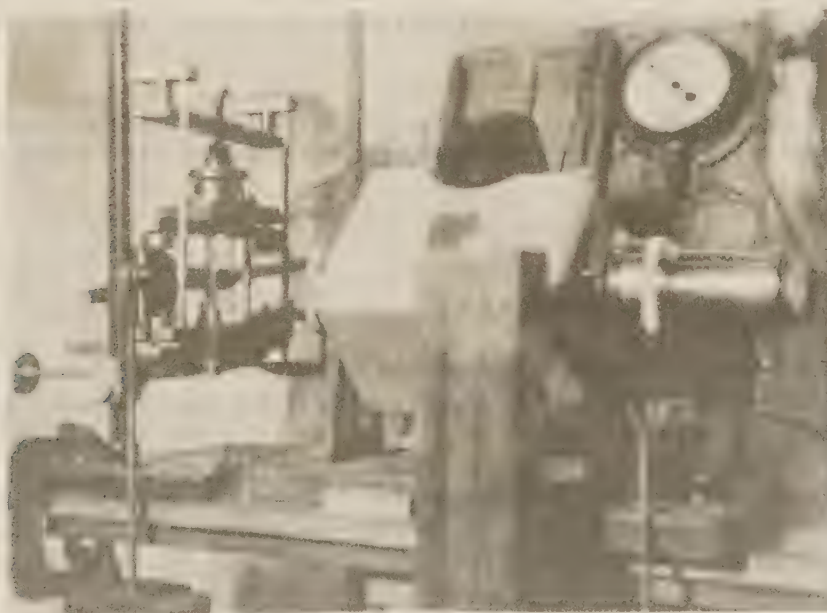


Fig. 74

la vis et le galet mesure l'effort auquel est soumis le galet. La force tangentielle est donnée par une tige fixée au centre du galet au bout de laquelle on suspend des poids croissants. L'image envoyée par l'appareil est reçue sur une vitre un papier calque permet de tracer tout le réseau de franges apparaissant.

La tige servant à suspendre des poids pour donner le couple est fixée au centre du galet par un boulon avec écrou; le serrage de l'écrou amène des perturbations dans les franges au centre du disque et il ne faut pas les perdre de vue.

3 - ETUDE DU RESEAU DES ISOCLINES

Le réseau des isoclines, qui sont le lieu des points où les contraintes principales ont les mêmes directions, a été tracé facilement. On s'est placé en lumière blanche polarisée rectilignement dans 3 cas :

- 1° - Force radiale 100 kg, pas de couple (*Figure 75*)
- 2° - Force radiale 200 kg, pas de couple (*Figure 76*)
- 3° - Force radiale 200 kg, couple de 100 kg/cm (*Figure 76*)

On a étudié le réseau des isoclines de 10° en 10°, en faisant tourner l'appareil "Kammerer" d'angles équivalents. Lorsque l'appareil décrit un quart de cercle, le réseau complet des isoclines peut être tracé.

a - La figure 75 nous montre ce réseau en compression simple de 10 kg/mm. Les efforts étant assez faibles, il y a peu d'écrasement du galet au point de contact. Les isoclines se rejoignent en ce point. Il est facile de tracer, à partir de ce réseau, celui des courbes orthostatiques nous donnant les directions des contraintes principales.

b - Dans le cas où la charge radiale est plus forte, la surface d'écrasement devient appréciable, les isoclines se déplacent symétriquement de part et d'autre du diamètre joignant les centres des zones de contact (*Figure 76*)

c - Si on applique le couple, il y a une déviation de toutes les isoclines; d'un côté, elles se dilatent et de l'autre, elles se contractent, le tout symétriquement par rapport au centre du galet.

4 - ETUDE DU RESEAU DES ISOCHROMES

Le réseau des isochromes a été réalisé en lumière monochromatique polarisée circulairement pour supprimer les isoclines. Les nicols ont été mis successivement croisés et parallèles pour avoir les franges de rang 1, 2, 3, 4 ... et 1/2, 3/2, 5/2

Cet essai a pour but de nous donner les lignes où la différence des contraintes principales est constante. Si σ_1 et σ_2 sont les contraintes principales, c la constante photo-élasticimétrique, e l'épaisseur du galet, on a :

$$c (\sigma_1 - \sigma_2) 2e = k \lambda \quad (1)$$

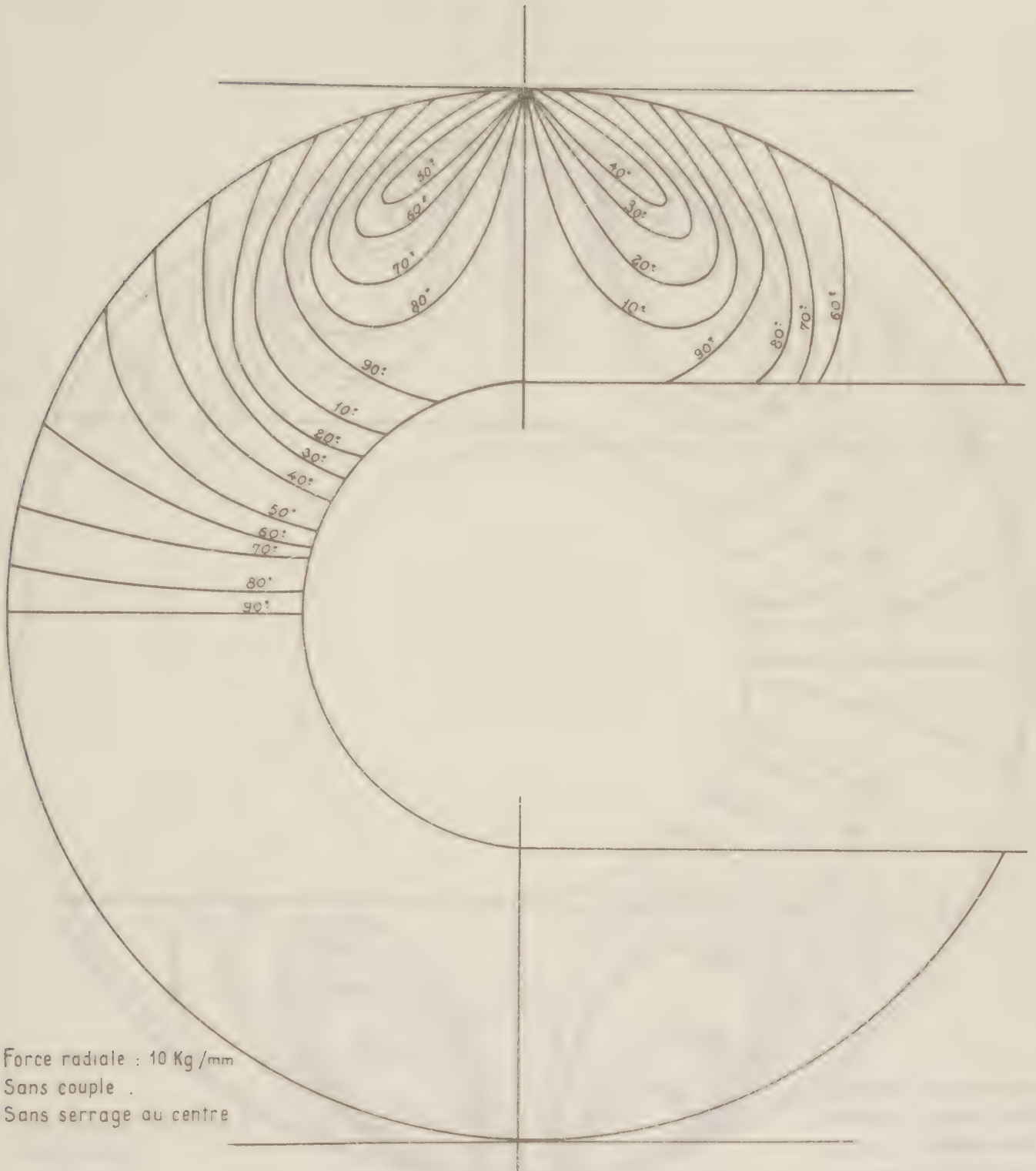


Fig . 75

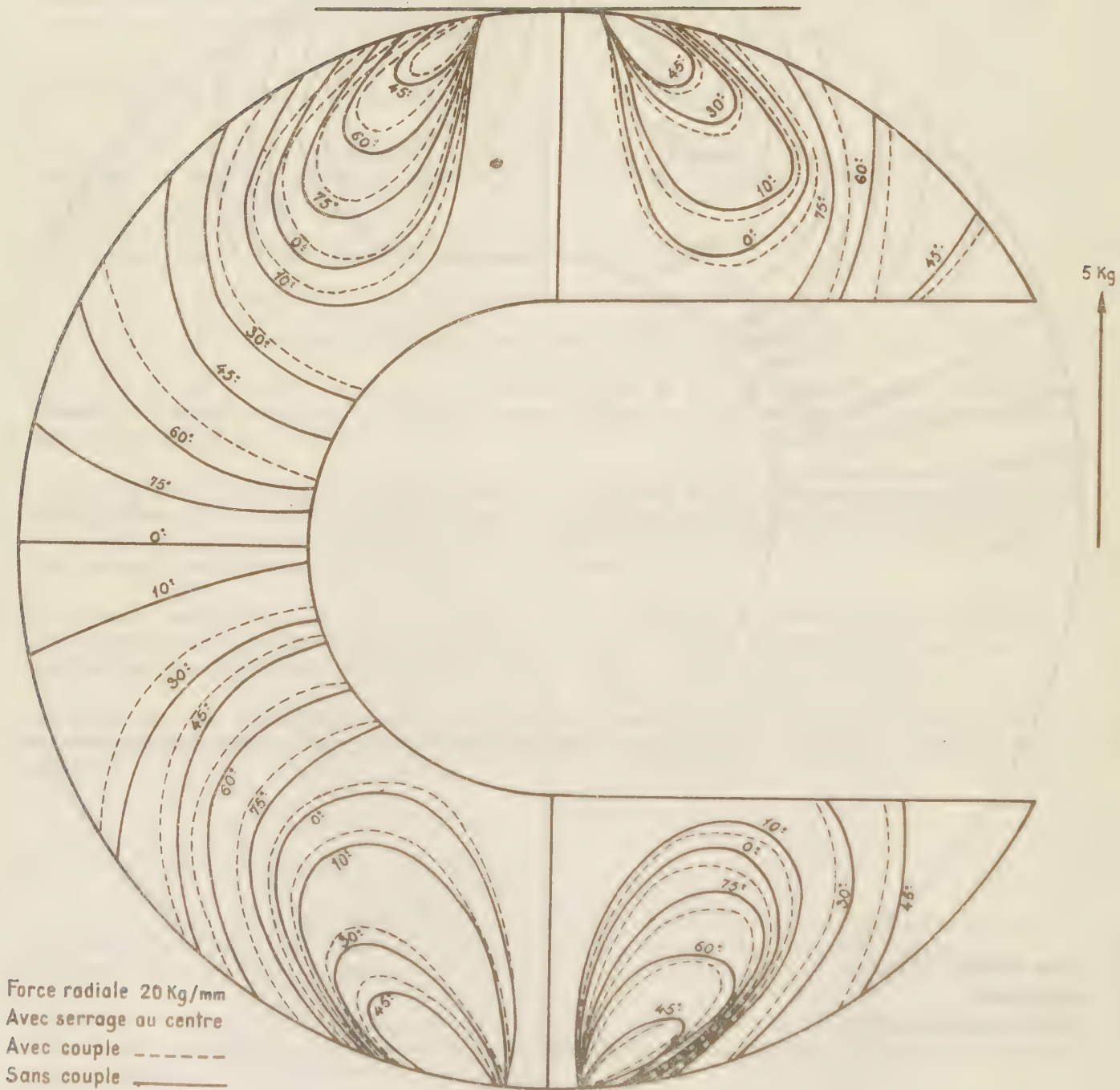


Fig. 76

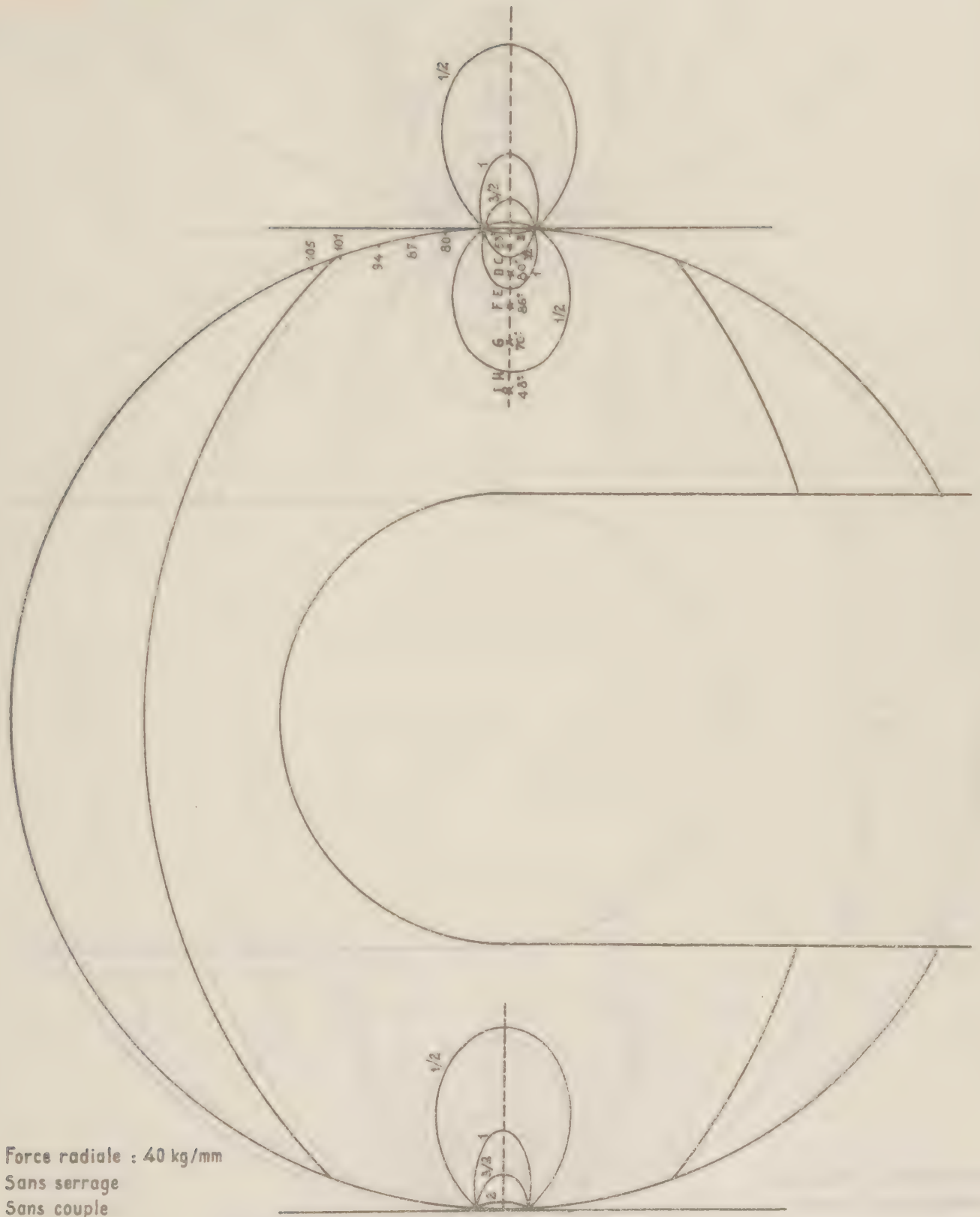


Fig. 77

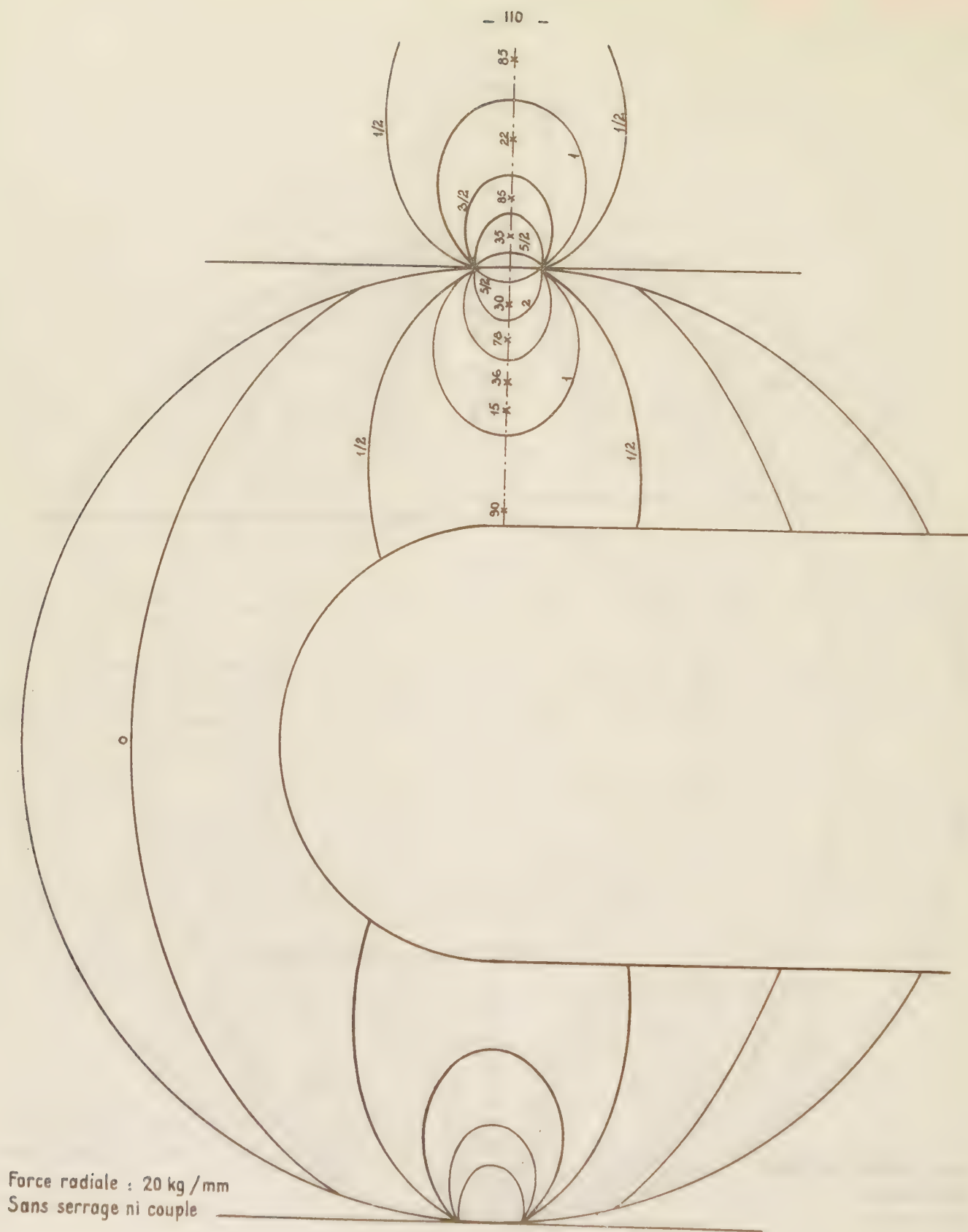


Fig. 77^{bis}

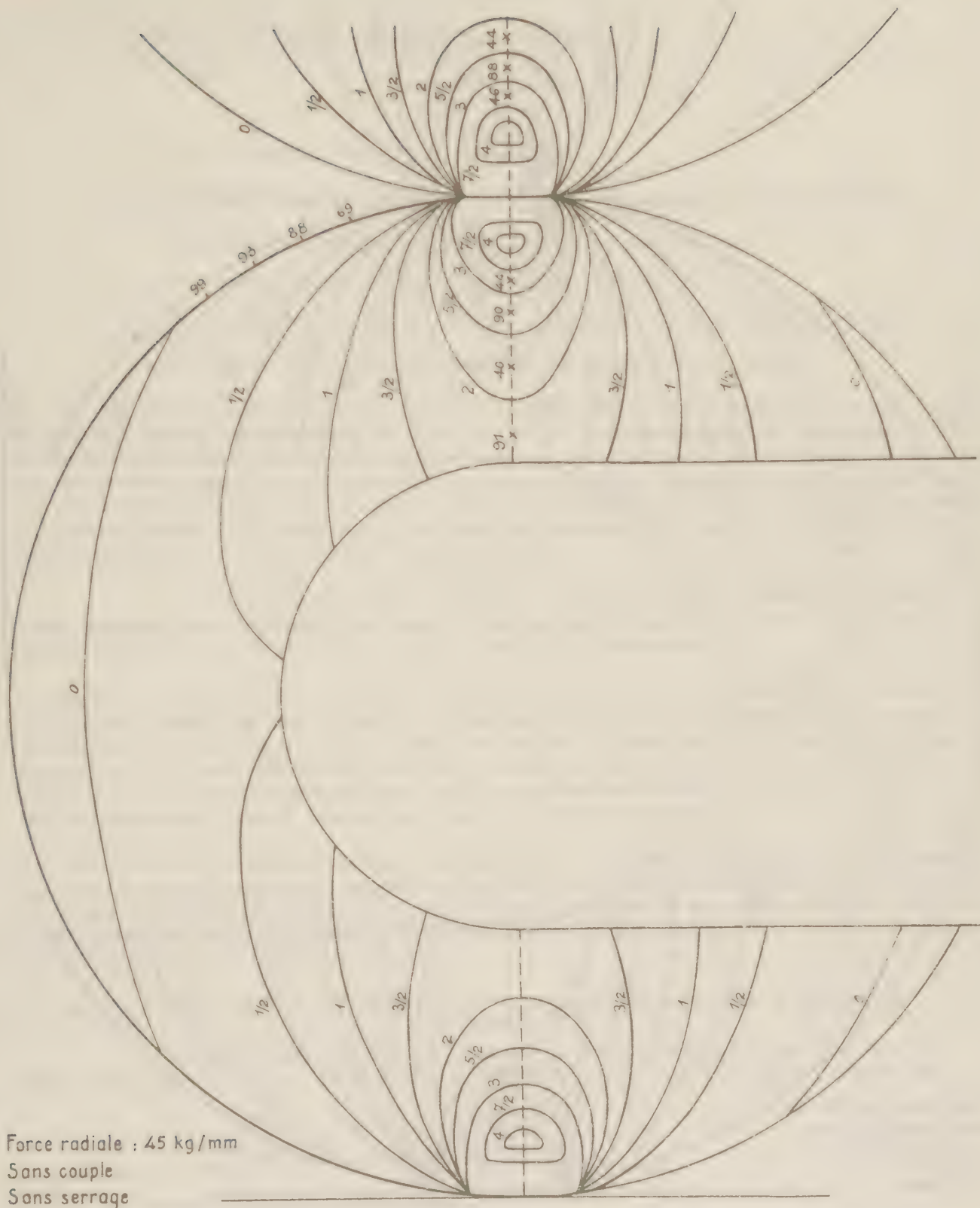


Fig. 78

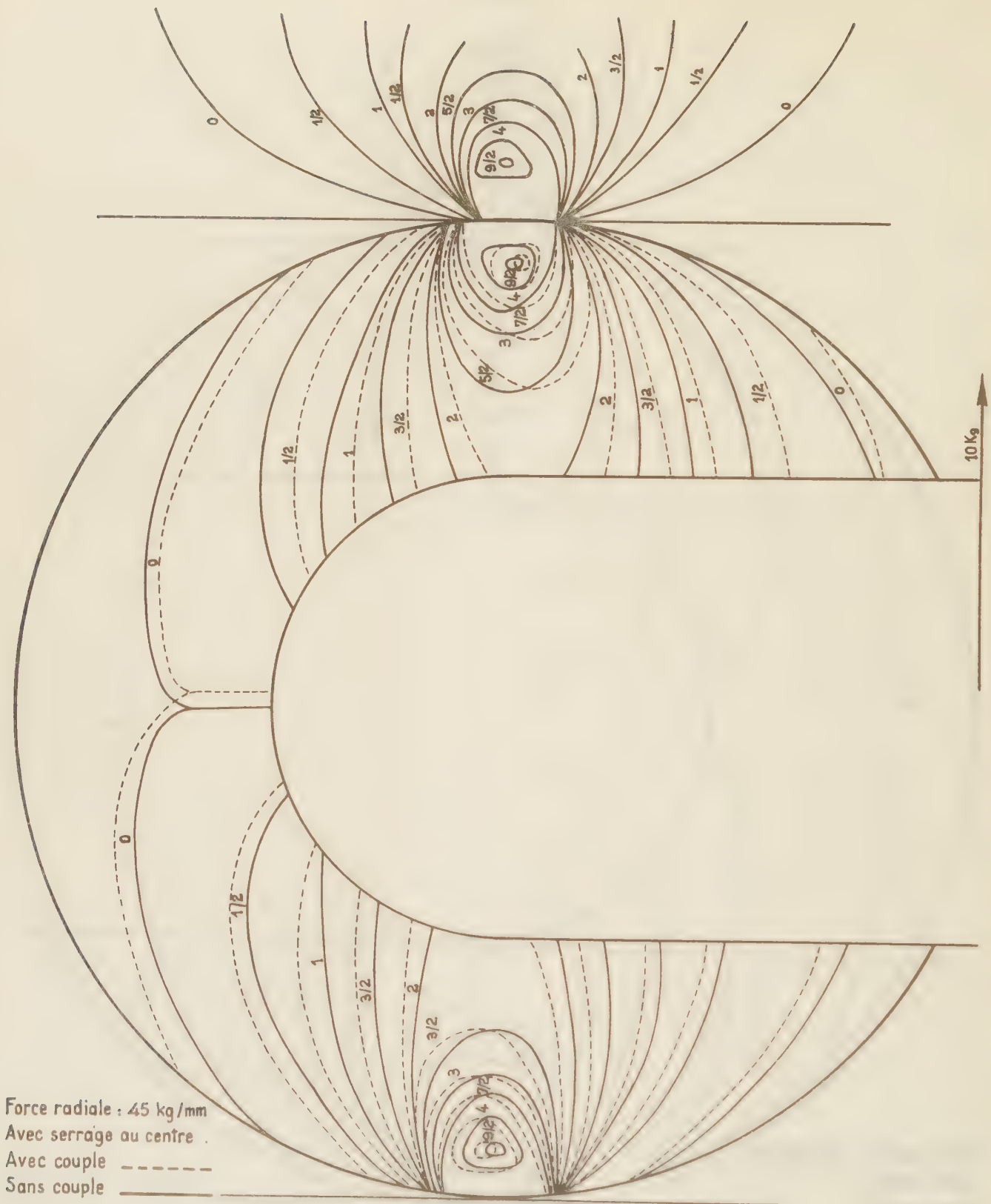


Fig. 78^{bis}

λ étant la longueur d'onde de la lumière monochromatique.

$$\lambda = 0,546 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Cinq réseaux de courbes ont été réalisés :

- 1° - Force radiale 100 kg, pas de couple (Figure 77)
- 2° - Force radiale 200 kg, pas de couple (Figure 77 bis)
- 3° - Force radiale 450 kg, pas de couple (Figure 78)
- 4° - Force radiale 450 kg, serrage central, pas de couple (Figure 78 bis)
- 5° - Force radiale 450 kg, couple de 200 kg/mm (Figure 78 bis)

a - Les figures 77 et 77 bis nous montrent les isochromes dans le cas de faibles forces radiales de 2,5 et 5 kg/mm; la compression étant faible, la zone d'écrasement est peu apparente. On distingue les isochromes de rang $5/2$, 2 , $3/2$, 1 , $1/2$, 0 . Les isochromes de rang 0 qui représentent une fibre neutre dans la maquette coupent les bords du galet en des points inclinés de 20° environ par rapport à la verticale. Ce sont là les points neutres qui ont été décelés par les essais à l'aide de jauges à fil résistant. L'intérieur des isochromes de rang 0 représente la partie comprimée du galet, l'extérieur est la partie tendue.

Il est facile de se rendre compte de ce qui se passe physiquement; le galet étant comprimé prend légèrement une forme elliptique. Les fibres extérieures à gauche et à droite fléchissent et se tendent; les fibres centrales se compriment.

b - Dans le cas où la force radiale est beaucoup plus forte (figures 78 et 78 bis), la zone d'écrasement grandit. Notons, d'après le relevé des isoclines, que la région où la contrainte est maximum se trouve dans la sous couche à une distance du bord égale à la moitié de la zone écrasée, résultat expérimental qui confirme les données théoriques du chapitre XI. La fibre neutre subit une certaine déformation du fait du serrage de la tige au centre du galet. La zone de compression grandit beaucoup par rapport à celle de tension.

c - Dans le cas où on applique le couple (figure 78 bis, courbes en pointillé), il y a rotation de toutes les isochromes dans le sens d'application de la force tangentielle de frottement. Les lignes neutres se déplacent également et coupent les bords en des points décalés. C'est une confirmation des résultats trouvés à l'aide des jauges de contraintes.

5 - DETERMINATION DE LA CONSTANTE PHOTO-ELASTIQUE DU PLEXIGLAS

On cherche la valeur de la constante c de la formule (1) dans le plexiglas étudié. Pour ceci un barreau de ce plexiglas a été mis sur un levier de flexion (Figure 79)

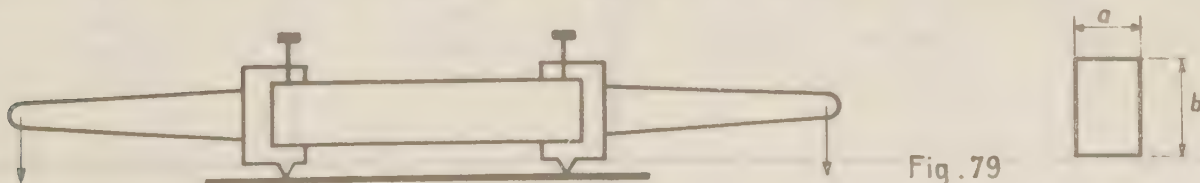


Fig. 79

En appliquant une force de 5 kg de chaque côté, des franges apparaissent sur l'image de ce barreau (Figure 80). Connaissant les contraintes correspondant à ces franges, on détermine C facilement.

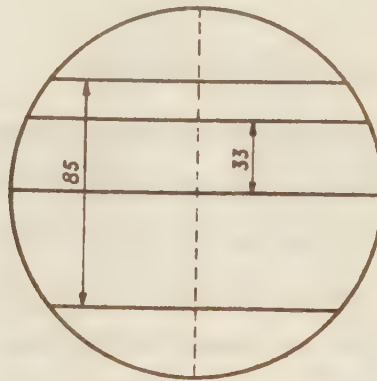


Fig. 80

6 - DETERMINATION DES CONTRAINTES RADIALES SUR LE GALET

On reprend la figure 77. L'axe de la pièce coupe les franges obtenues en des points bien déterminés; en prenant des points intermédiaires et en y faisant passer des franges, on lit sur l'appareil la différence de marche leur correspondant en $\frac{n\lambda}{100}$

$$\delta = c(\sigma_1 - \sigma_2) 2e = K\lambda + \frac{n\lambda}{100}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{c \times 2e}$$

On possède pour chaque point les valeurs de k et de n ; on obtient ainsi le tableau suivant.

DISTANCE AU BORD :mm	K	- n	$\sigma_1 - \sigma_2$ kg/mm ²
CHARGE 100 KG			
0,1	2	0	2,95
0,3	1	53	2,28
1,1	1	50	2,22
2,3	1	20	1,77
2,8	1	0	1,48
4	0	86	1,27
6	0	70	1,03
7,4	0	50	0,74
8,7	0	48	0,71

DISTANCE AU BORD: mm	K	N	$\sigma_1 = \sigma_2$ kg/mm ²
CHARGE 200 KG			
0,5	2	80	4,21
1	2	80	3,88
2	2	9	3,48
4	1	70	2,85
6	1	60	2,11
8	1	50	1,81
10	1	40	1,62
13,5	1	0	1,4
18,5	0	90	1,26
CHARGE 450 KG			
1,7	3	50	4,92
2,5	4	0	5,63
3,5	4	0	5,63
4,25	3	50	4,92
5	3	44	4,35
6	3	0	4,22
6,5	2	90	4,07
8	2	50	3,52
9,5	2	40	3,37
11	2	0	2,82
14	1	91	2,7

Les résultats obtenus sont consignés sur la figure 81; on y retrouve l'allure des courbes de Belajeff (Figure 67).

7 - DETERMINATION DES CONTRAINTES TANGENTIELLES SUR LE GALET

On recommence de la même façon, en prenant des points sur les bords. Dans ce cas, on a une simplification due au fait qu'une des contraintes principales est nulle; le seul effort existant est tangentiel. On obtient ainsi la formule simplifiée

$$\delta = c \sigma_1 \times 2e = K\lambda + \frac{n\lambda}{0,0}$$

On obtient ainsi le tableau suivant

λ	K	N	σ
8		20	- 0,296
12		14	- 0,192
15		9	- 0,0885
20		0	- 0,
24		5	+ 0,074

Ceci nous donne, par symétrie, les courbes (a) et (b) (*Figure 81 bis*). Il y a une ressemblance évidente entre ces courbes et celles de la figure 71, obtenues à l'aide des jauges de contraintes.

8 - CONCLUSIONS -

Les deux études sur les contraintes au point de contact, faites par les jauges de contrainte ou par lumière polarisée, ont donné des résultats concordants. Elles nous permettent de faire une remarque sur la théorie de M. Warren, citée dans les *Transactions of the A. S.M.E.* (Mai 1944) dont nous avons déjà parlé. M. Warren explique le mécanisme de l'usure par les surtensions superficielles provoquant des craquelures à la surface du galet. Ces craquelures sont aggravées par la pression hydrostatique de l'huile de graissage quand elles passent au point de contact. Il affirme que, lorsqu'un galet lent et un galet rapide roulent et glissent l'un sur l'autre, on constate sur le galet lent une tension en amont du point de contact et une compression en aval, sous l'effet de la force tangentielle.

Il semble que cette étude nécessite d'être complétée. En effet, pour que cette force tangentielle existe, il est nécessaire d'avoir une pression radiale qui crée une zone de contraintes hertziennes se superposant aux contraintes de frottement. Ceci fait que la zone de compression s'étend de part et d'autre de la zone de contact et non d'un seul côté.

L'étude faite nous montre que chaque élément du galet, en effectuant un tour complet, a des contraintes changeante deux fois de signe alors que la théorie précédente nous incitait à croire que la contrainte changeait une seule fois de sens. On a donc un phénomène d'efforts alternés de fréquence double de la rotation.

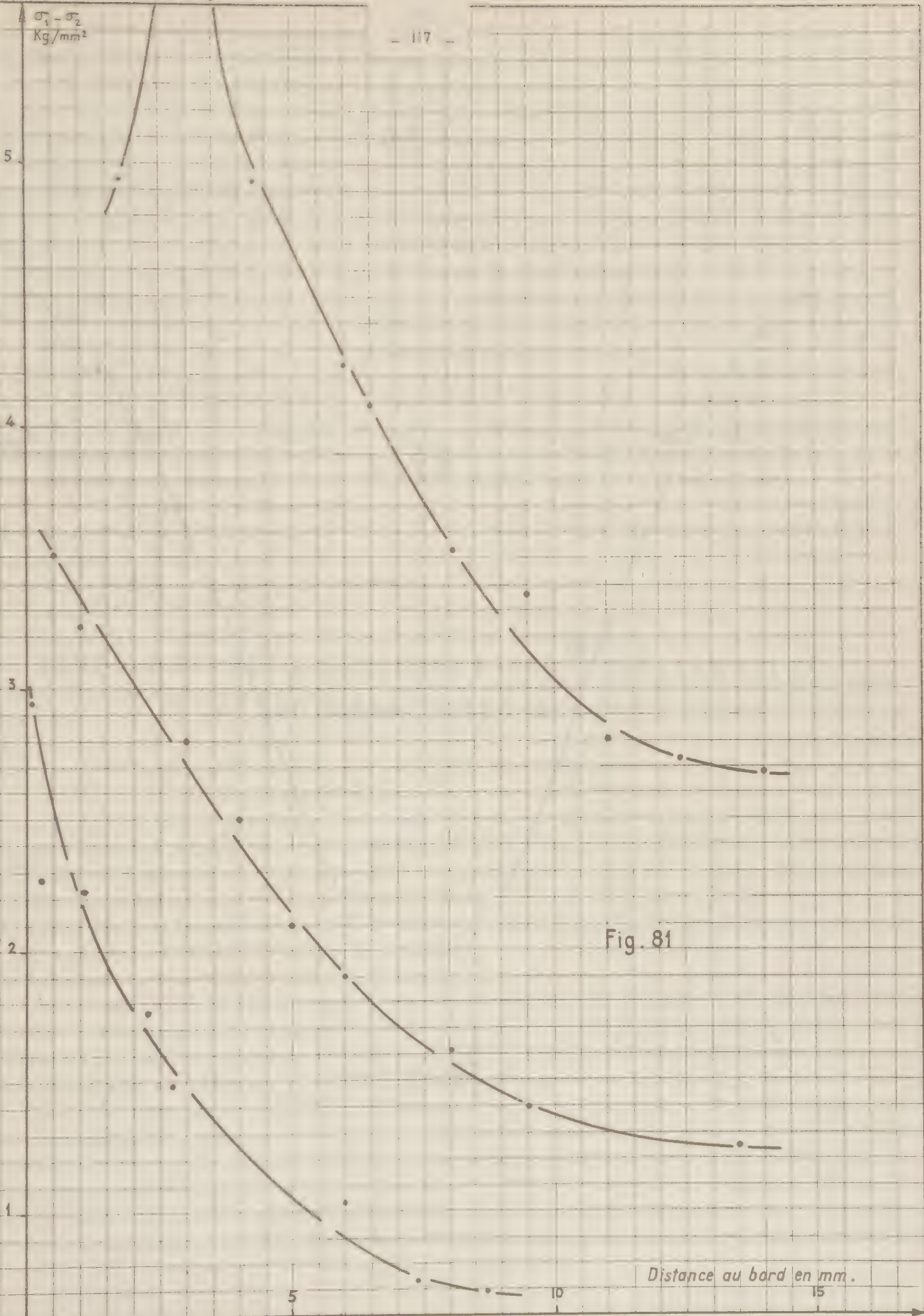


Fig. 81

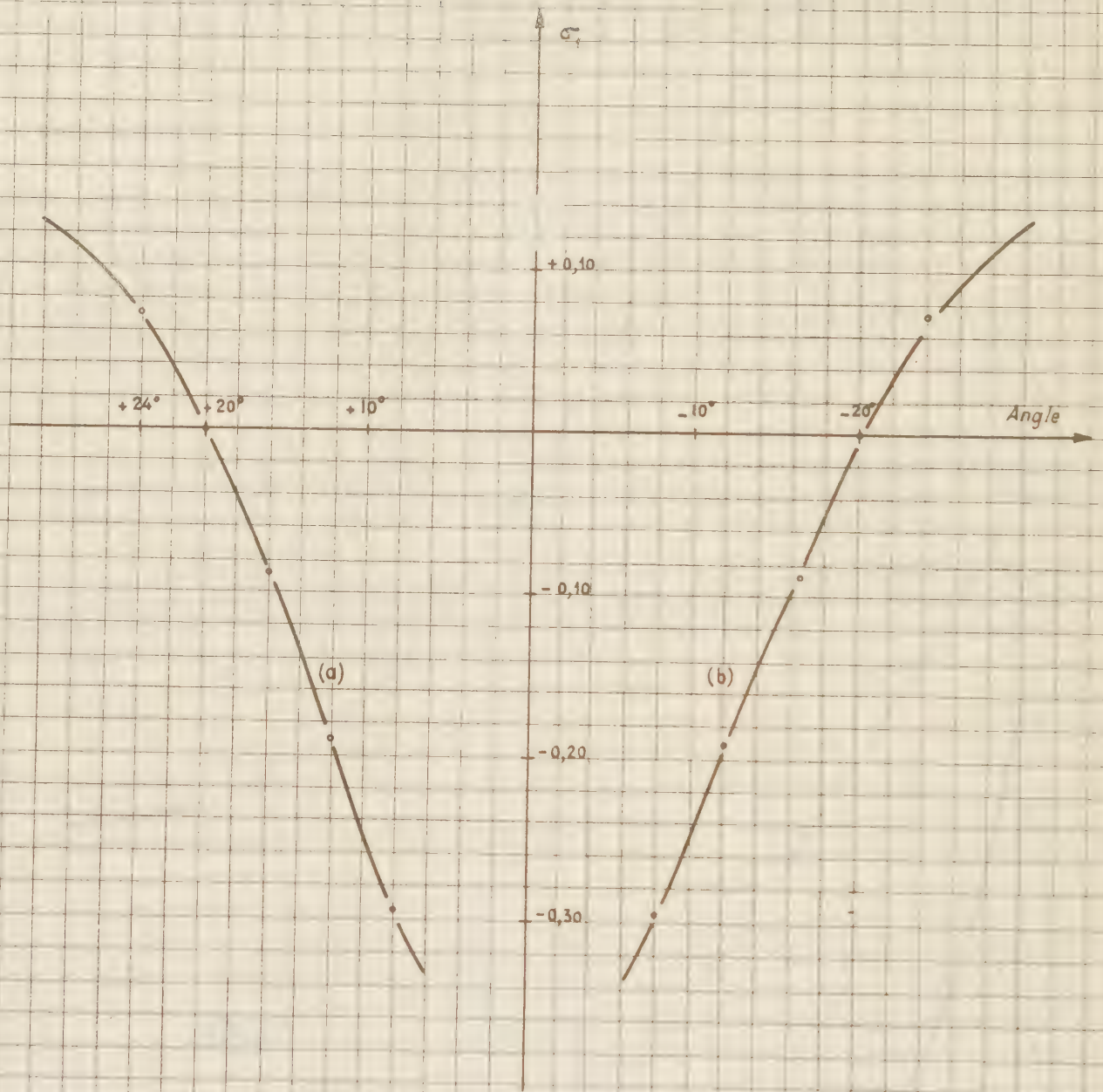


Fig. 81^{bis}

. D .

ETUDE DES FAIBLES USURES PAR L'UTILISATION
D'ISOTOPES RADIO-ACTIFS

- CHAPITRE XIV -

METHODE DES TRACEURS RADIO-ACTIFS APPLIQUEE AUX PHENOMENES D'USURE DES PLASTIQUES

I - IMPERFECTION DES METHODES CLASSIQUES -

Nous avons étudié jusqu'à ce jour deux méthodes de mesure de l'usure: la méthode de la variation de masse et celle de la variation de diamètre.

La méthode des différences de poids a été abandonnée dès le premier essai, le plastique absorbant du lubrifiant et par conséquent, faussant complètement les résultats d'essais.

La méthode des différences de diamètre a été retenue comme la seule pouvant être utilisée. Nous en avons pourtant signalé les défauts principaux et son imprécision.

- a - L'état de surface du galet après usure n'est pas très bon; la définition de la forme géométrique devient difficile. On ne peut mesurer un diamètre au micron alors que l'état de surface donne des aspérités de l'ordre du centième.
- b - Une mesure d'usure étant la différence de deux mesures diamétrales (avant et après l'usure) l'erreur de mesure est donc la somme des deux erreurs de lecture. Si l'usure est faible, cela fait une erreur relative beaucoup trop grande.
- c - Les variations de l'humidité atmosphérique peuvent avoir une influence sur les dimensions, d'où nécessité de s'entourer de nombreuses précautions pour la mesure.
- d - Les essais d'usure sont beaucoup trop longs. Pour relever une courbe d'usure, il faut faire des essais pendant plus de trois semaines, sans arrêt. On ne peut relever plus d'un point de la courbe en 24 heures.

Comme le disait A. Guillery "la difficulté des essais d'usure réside dans la presque impossibilité de faire varier les facteurs de la fonction d'usure pour réduire le temps d'essai."

- e - Il est difficile de se rendre compte de ce qui se passe dans les courbes d'usure du voisinage de l'origine, d'est-à-dire dans les premières minutes de l'essai. Les usures sont alors trop faibles, inférieures aux erreurs expérimentales. La mesure n'est possible qu'au bout d'un certain temps.

L'utilisation des traceurs radio-actifs nous permettra de surmonter bon nombre de ces inconvénients.

2 - METHODE DES ISOTOPES RADIO-ACTIFS

Les isotopes radio-actifs sont obtenus en soumettant un corps donné à un flux de particules, en général des neutrons lents. La réaction nucléaire qui se produit généralement, réaction (n, γ) consiste en l'absorption d'un neutron par le noyau. Elle donne naissance à un isotope du corps irradié, qui a la propriété d'émettre des particules ou des radiations. Ce rayonnement est décelable au compteur de "Geiger-Muller".

Ces isotopes, connus aussi sous le nom de traceurs radio-actifs, sont décelables, même en quantité extrêmement petite, par le rayonnement qu'ils émettent. Ils ont été beaucoup utilisés en biologie, en médecine, en physique et en chimie. Ils peuvent être appliqués à la mécanique dans l'étude de l'usure. Pour ceci, il suffit que l'éprouvette à user contienne un isotope radio-actif, réparti d'une façon homogène dans sa masse. On provoque l'apparition de cet isotope en soumettant l'éprouvette au flux de neutrons d'une pile atomique. On recueille les particules usées dans le lubrifiant utilisé. La radio-activité décelée dans le liquide permet de déterminer la quantité de matière qui a passé de l'éprouvette au lubrifiant.

3 - BIBLIOGRAPHIE -

Un certain nombre de travaux sur l'utilisation des traceurs radio-actifs pour la détection de l'usure ont été effectués aux Etats-Unis. MM. Pinotti, Hull et Mc Laughlin ont publié une étude de l'usure des segments de pistons d'automobiles (Petroleum Engineer, Juin 1949). Les segments étaient irradiés à la pile atomique du Laboratoire National de Oak Ridge. Les trois chercheurs sont arrivés à tracer quelques courbes d'usure.

- MM. Merchant et Krabacher ont étudié l'usure des outils de coupe de machine-outil (Journal of Applied Physics U.S.A., Vol. 22, N° 12, Décembre 1951, p. 1507). Les outils ont été irradiés également à la pile atomique de Oak Ridge.
- MM. Burwell et Strong ont étudié le frottement et l'usure de deux cylindres. (Metal Progress, Septembre 1951, p. 69 à 74).
- La B.F. Goodrich Co aux U.S.A. a étudié l'usure des pneus de camions en y incorporant du radio-phosphore et en détectant la radioactivité de la trace laissée par le pneu sur la chaussée (Modern Industry, 15 Janvier 1952).

Ces différents chercheurs ont tous souligné la fécondité de cette méthode d'étude des faibles usures.

4 - CAS DES MATIERES PLASTIQUES -

Les études faites aux U.S.A. jusqu'à ce jour par cette méthode ont porté sur le caoutchouc ou les métaux ferreux. La grande puissance de la pile d'Oak Ridge permettait l'irradiation du fer malgré sa faible section efficace. Par contre, les matières plastiques n'ont jamais été étudiées de ce point de vue mais uniquement par les méthodes classiques. Il est donc intéressant de voir ce que la méthode radio-active peut donner. L'irradiation des galets en plastique peut se faire très simplement au Commissariat à l'Energie Atomique, à la Pile de Fort-Châtillon.

5 - AVANTAGES DE LA METHODE RADIO-ACTIVE

La méthode radio-active présente de nombreux avantages :

- Elle est d'une extrême sensibilité, il suffit de traces infinitésimales de plastique dans l'huile pour pouvoir les déceler. Les faibles usures peuvent donc être étudiées.
- Le facteur temps qui, on l'a vu, est un grand inconvénient dans les essais d'usure, se trouve en partie éliminé. Des mesures peuvent être faites très proches les unes des autres.
- Les variations de masse et de dimensions du galet sous l'effet du lubrifiant ou de l'humidité nous importent peu, car c'est uniquement la portion du galet qui a passé dans le lubrifiant qui est mesurée par l'intermédiaire du rayonnement qu'elle émet.

6 - DETERMINATION DE LA COURBE DE DECROISSANCE RADIO-ACTIVE D'UN ECHANTILLON DE PHENOL FORMALDEHYDE STRATIFIE

L'essai qui s'impose au premier abord est d'étudier le comportement d'un échantillon de plastique soumis au rayonnement de la pile. Il faut voir s'il contient une impureté susceptible d'être activée ou s'il faut y ajouter un corps pouvant fournir les radio-isotopes désirés.

Deux éprouvettes de phénol formaldéhyde stratifié des catégories "P 44 classe 1" et "P 44 classe 2" ont été introduites dans la pile atomique de Fort Châtillon pour une durée de 60 heures sous un rayonnement de $9,5 \times 10^8$ neutrons/cm²/sec. Elles ont été portées au compteur de Geiger 4 heures après leur retrait de la pile, derrière un écran d'aluminium de 1 000 mg/cm². Cet écran avait un double but : d'une part, de diminuer le rayonnement des échantillons et de ne pas saturer le compteur; d'autre part, d'arrêter tous les rayons α et β et de laisser passer uniquement les rayons γ très pénétrants. En ne comptant que les rayons γ durs, on n'est plus ennuyé par les effets d'auto-absorption des éprouvettes.

Les deux éprouvettes ont fait preuve d'une assez forte activité. On a compté chaque minute le nombre de coups enregistré par le compteur. On a porté sur un diagramme, en abscisse le temps sur une échelle linéaire, en ordonnée le nombre de coups/minute sur une échelle logarithmique. On a ainsi obtenu deux droites parallèles décroissantes (Figure 82) ce qui indique que les deux plastiques étudiés contiennent la même impureté qui est l'origine de cette radio-activité artificielle.

La détermination de la période radio-active nous indiquera de quel corps il s'agit. On prend le point A où une des courbes coupe l'axe des y, $0 A = 14400$ coups/minute. On prend le point A' d'ordonnée 7.200, la longueur A'A'' nous donne la période; on trouve 14,7 heures. On opère de même pour l'autre éprouvette; on trouve 14,6 heures. Les tables des périodes radio-actives nous indiquent que le corps cherché est Na 24, de période 14,8 h (émetteur β, γ). Il est fort probable que les plastiques étudiés contiennent du sodium à l'état d'impureté introduite volontairement ou non.

Remarque : Une détermination plus précise de cette période a été faite en comptant le nombre de coups/minute à 3 jours d'intervalle. Soit N_0 le nombre de coups/minute au départ, N le nombre de coups/minute au bout de trois jours, t le temps qui s'est écoulé entre les deux mesures T , la période cherchée.

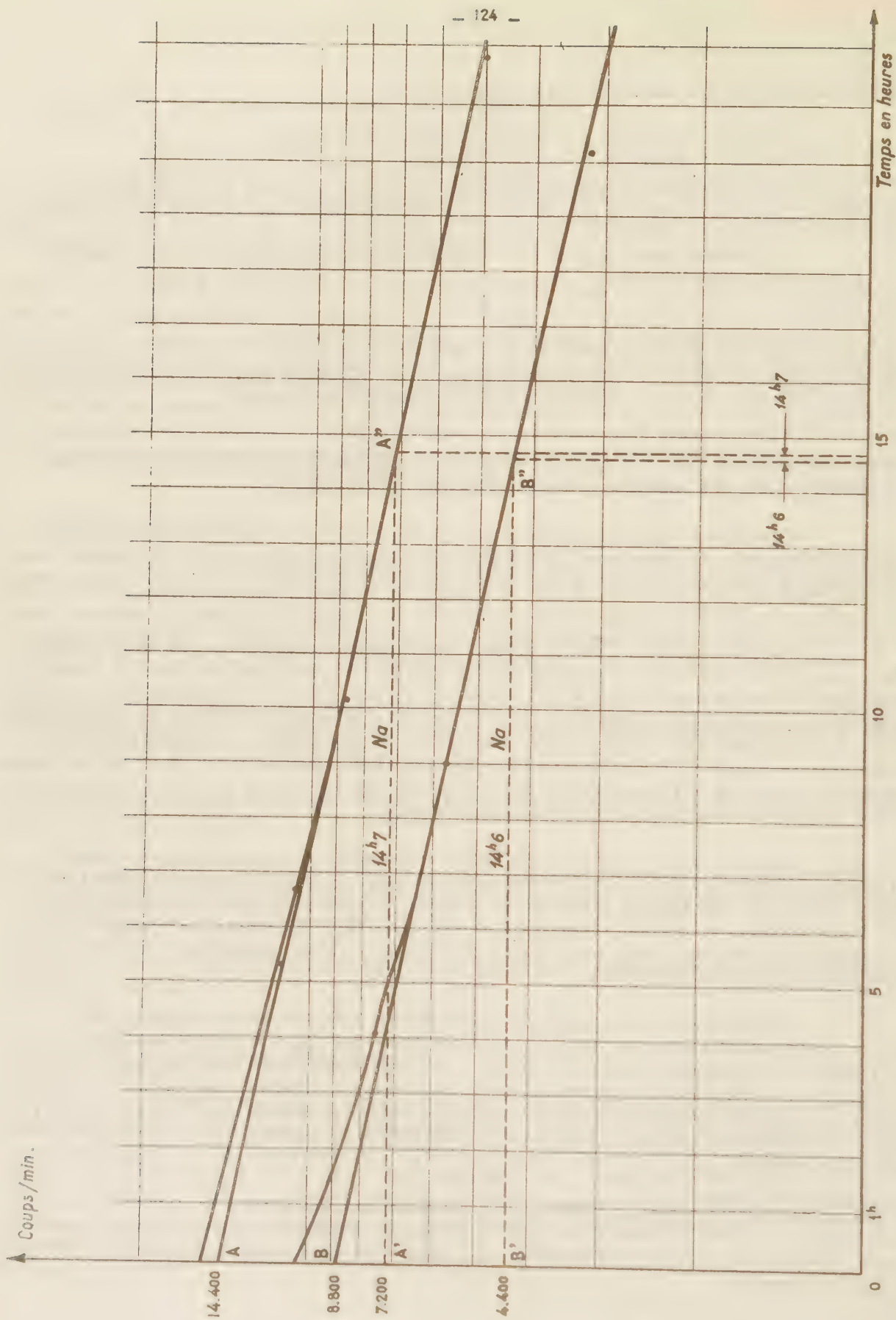


Fig. 82

1ère mesure : $N_0 = 2500$ coups/minute ± 25 ; temps = 0 minute

2ème mesure : $N = 82$ c/m $\pm 3,5$; temps: $t = 3$ jours = 4285 m

$$N = N_0 \times 1/2^{\frac{t}{T}}$$

On trouve : $T = 869$ minutes

Or, pour Na, on a $T = 14,8$ h = 888 minutes, soit une erreur de 2% dans la mesure de la période.

7 - ETUDE DES COURTES PERIODES

Il est intéressant également de savoir si les phénoplastes stratifiés contiennent d'autres éléments, également à l'état d'impuretés, mais dont la faible période n'a pas permis la détection dans la mesure précédente.

Pour cela on a mis une éprouvette de plastique dans la pile pendant 30 minutes, elle a été retirée et mise au compteur 5 minutes après son retrait de la pile. En comptant la décroissance de l'activité, on a obtenu une courbe se terminant par une droite AB représentant le sodium (Figure 83).

En retranchant des ordonnées de la courbe, la valeur des ordonnées de cette droite, on obtient une seconde droite CD indiquant la présence d'un autre corps. Cette droite nous donne une période de 30 minutes environ; c'est la période de l'isotope : Cl 38, émetteur β , γ également.

Il y a donc de fortes chances pour que l'impureté contenue dans les phénoplastes stratifiés, soit du chlorure de sodium.

8 - ETUDE DE LA REPARTITION DU SODIUM DANS LE PLASTIQUE

Cinq échantillons de plastique, prélevés en des endroits différents de planches différentes, ont été soumis en même temps à l'action de la pile pendant 60 heures. Les éprouvettes ont été pesées auparavant. Après les avoir retirées de la pile, on mesure leur activité au compteur de Geiger. Cependant, comme on ne peut mesurer l'activité des cinq éprouvettes en même temps, on a forcément une décroissance d'activité entre la première mesure et la cinquième. Pour faire une mesure correcte, on doit faire une correction de temps en notant le nombre de minutes s'écoulant entre la première mesure et les suivantes. On prend pour origine des temps le moment où se fait le comptage de la première éprouvette. Si pour la nième éprouvette, on compte N coups/minute au bout du temps t , le nombre de coups N_0 qu'elle aurait indiqué au temps 0 aurait été :

$$N = N_0 \cdot 1/2^{\frac{t}{T}} \quad T \text{ étant la période.}$$

En faisant le quotient des activités par les masses des échantillons, on obtient l'activité spécifique du plastique qui est :

752 $\pm$ 9	762 $\pm$ 8
745 $\pm$ 8	76 $\pm$ 8
732 $\pm$ 8	

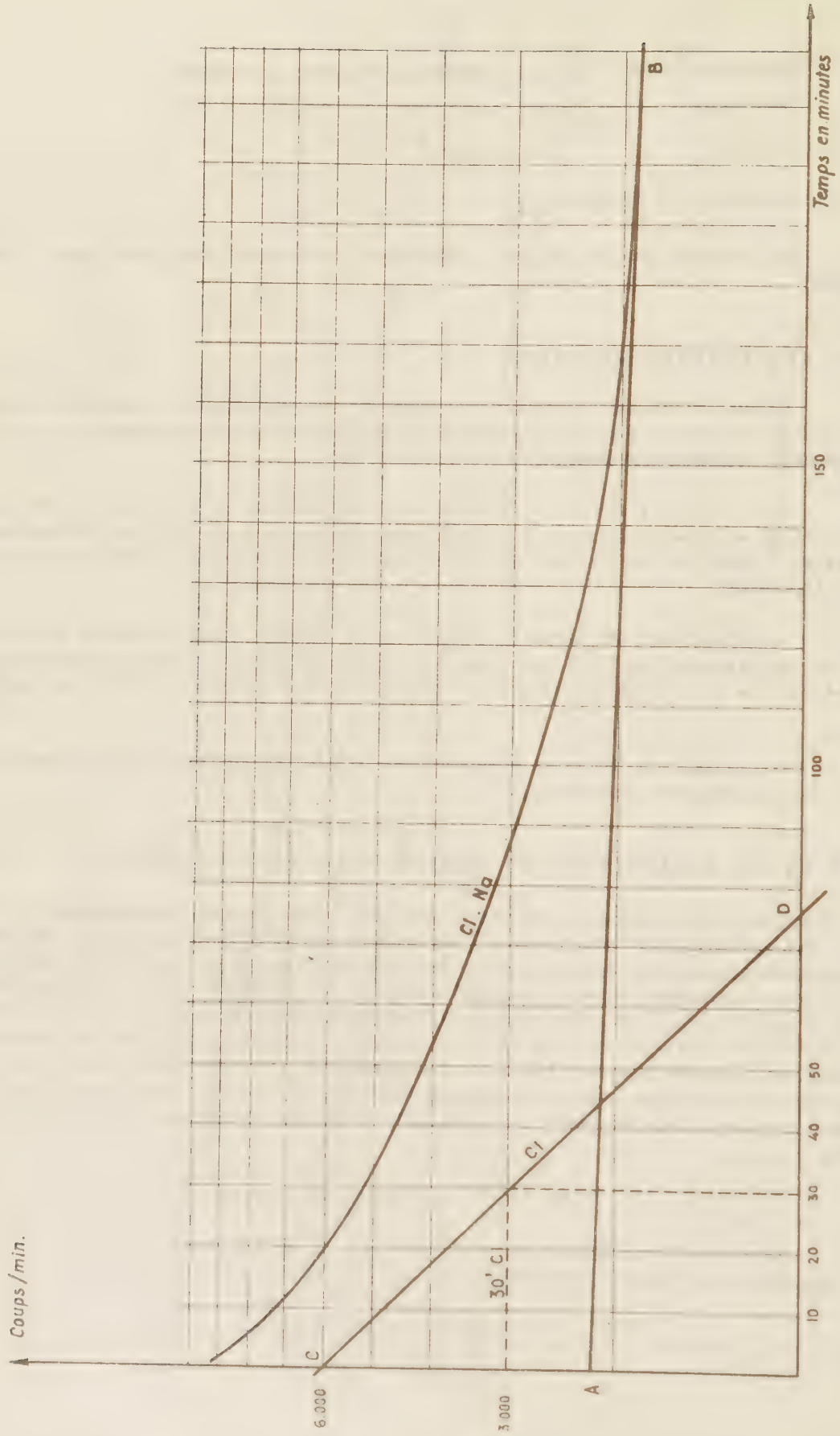


Fig. 83

L'erreur statistique de comptage est :

$\sigma = \pm \sqrt{N}$ pour le nombre total N de coups enregistré, divisée par la masse de l'éprouvette, elle donne ± 4 . La dispersion des résultats est de 4% en comptant également dans ce chiffre les erreurs de pesée. C'est une bonne approximation.

9 - DOSAGE DU SODIUM CONTENU DANS LE PLASTIQUE

Une certaine quantité de Cl Na est activée à la pile en même temps qu'une éprouvette de matière plastique. On en prend 310 mg qu'on dissout dans 100 cm³ d'eau. On en retire 2 cm³ contenant 6,2 mg de Cl Na, soit $6,2 \times 23/58,5 = 2,4$ mg de Na. On soumet le sel et l'éprouvette au compteur G.M.. On obtient pour le Cl Na, $\alpha = 5136$ c/m pour 2,4 mg. L'échantillon donne 2500 c/m pour 3,017 g. Les flux de neutrons pour l'irradiation étaient de :

$$\begin{aligned} &9,5 \times 10^8 \text{ neutrons/cm}^2/\text{sec pour Cl Na, et} \\ &8,3 \times 10^8 \text{ pour le plastique.} \end{aligned}$$

En faisant ces corrections on obtient :

$$\frac{2,4 \times 2500 \times 9,5 \times 10^8}{5136 \times 8,3 \times 10^8} = 1,34 \text{ mg de Na dans l'éprouvette}$$

ou bien :

$$\frac{1,34}{3,017} = 0,44 \text{ mg de Na par g de plastique}$$

Dans le cas où le plastique contiendrait du Cl Na, sa proportion serait :

$$\frac{6,2 \times 2500 \times 9,5}{5136 \times 8,3 \times 3,017} = 1,15 \text{ mg de Cl Na par g}$$

Il est donc possible d'augmenter cette proportion pour rendre la méthode beaucoup plus sensible. Cela reviendrait à mettre plusieurs grammes de Cl Na par kg de plastique dans un échantillon par accord avec un fabricant

10 - ETUDE DE L'HOMOGENEITE DE L'IRRADIATION DES GALETS EN PLASTIQUE

Cet essai a eu pour but de voir si les galets superposés les uns sur les autres s'irradient de la même façon dans la pile malgré leurs positions différentes par rapport au flux de neutrons. Il est aussi de voir si l'irradiation à 1 mm de profondeur est la même qu'en surface, l'usure des galets atteignant au maximum 1 mm.

Dans ce but, quatre galets sont irradiés à la pile pendant 60 heures, empilés les uns sur les autres. A leur sortie, on leur enlève au tour une couche extérieure de $2/10^3$ de mm et une couche à 1 mm de profondeur, de l'ordre de $2/10^3$ de mm également. Les copeaux

sont recueillis sous forme de poudre, pesés et mis au compteur. On obtient l'activité spécifique suivante par gramme de plastique, après avoir effectué les corrections de temps.

Galet N°	A la surface	Profondeur 1mm
1	36.300	36.100
2	35.300	35.600
3	35.300	35.600
4	35.600	36.000

Erreur statistique calculée : 333 coups/minute

Dispersion des essais : 3% en comprenant les erreurs de pesée.

11 - VERIFICATION DE L'HOMOGENEITE DE LA SUSPENSION DES PARTICULES DE PLASTIQUE DANS L'HUILE DE GRAISSAGE.

Cet essai a pour but de vérifier si la suspension d'une quantité donnée de matière plastique dans de l'huile de graissage donne toujours les mêmes indications au compteur G.M. C'est une condition extrêmement importante pour l'exactitude de la mesure. Dans ce but, on prend un récipient contenant de l'huile, on y verse une certaine quantité de poudre radio-active de plastique; elle est ensuite bien brassée; on y met un compteur plongeur G.M. Il faut dire qu'on a choisi l'huile de graissage suffisamment visqueuse (Gargoil Vectra Heavy, 37° Engler) pour ne pas avoir de dépôt rapide de particules, ce qui fausserait la mesure.

On a fait trois fois de suite des mesures après brassage; on obtient les résultats suivants :

Premier essai : 9 157 coups en 5 minutes
Deuxième essai : 9 225 coups en 5 minutes
Troisième essai: 9 334 coups en 5 minutes

soit une dispersion de 2,2% comprenant 1% d'erreur statistique de comptage et 1,2 % de dispersion propre et en négligeant la décroissance radio-active très faible pendant le temps qu'a duré la mesure.

12 - DETERMINATION DE L'USURE D'UN GALET EN PLASTIQUE

Deux galets identiques sont irradiés à la pile pendant 60 heures. Ils sont retirés et l'un d'eux est monté sur la machine "Amsler" où il est usé par un galet en acier à mauvais état de surface, pendant 5 heures, sous pression de 10 kg/mm; il fait 61.400 tours. Au bout de ce temps, il est retiré de la machine. L'huile de lubrification est recueillie dans un récipient.

Le galet témoin est tourné superficiellement; on lui enlève des copeaux en poudre, on en pèse 102,4 mg; on les mélange dans une quantité d'huile identique à celle utilisée, mise dans un récipient de forme identique.

Radioactivité de l'huile témoin : 10 446 coups en 2 minutes

Radioactivité de l'huile d'usure: 12 068 coups en 2 minutes

D'où la masse de produit usé :

$$\frac{102,4 \times 12\ 068}{10\ 446} = 118,3\ \text{mg}$$

Le galet a donc perdu 118,3 mg en 5 heures.

Vérification du résultat :

Le galet a été soumis volontairement à une usure anormale et très forte pour permettre de vérifier le résultat obtenu par la métrologie. Le galet usé a été repéré sur trois diamètres et mesuré avant et après.

$$36,003 - 35,849 = 0,154\ \text{mm}$$

$$36,001 - 35,895 = 0,106\ \text{mm}$$

$$35,996 - 35,832 = 0,164\ \text{mm}$$

Usure diamétrale moyenne : 0,139 mm

Usure radiale moyenne : h = 0,07 mm

Poids de matière usée : P = 2 r x e x h x d = 102,9 mg

D'où la différence de : $\frac{16}{118} = 13\%$

Les deux résultats sont donc comparables; les différences sont dues aux imperfections des méthodes de mesure en dimension ou radio-actives. Une plus grande précision peut être obtenue mais la comparaison des résultats est valable.

13 - VARIATION DES PROPRIETES MECANQUES DES PHENOLS FORMALDEHYDES SOUS L'EFFET D'UN FLUX PROLONGE DE NEUTRONS -

Nous savons que l'exposition d'un objet à un flux de neutrons trop violent ou trop prolongé peut en altérer les propriétés mécaniques. Il faut voir si ceci n'a pas lieu pour les éprouvettes qui nous intéressent.

Un rapport déclassifié de la Commission à l'Energie Atomique Américaine nous rassure complètement à ce sujet (ORNL 928, p. 131 à 134). (Figures 84 et 85)

Ce rapport étudie les effets d'un flux de neutrons sur les propriétés mécaniques des plastiques. Les propriétés des phénols formaldéhydes s'altèrent après une exposition à plus de 10^{15} neutrons/cm². Or, l'exposition maximum à la pile de Fort-Chatillon a été de 60 heures, sous un flux de $9,5 \times 10^8$ neutrons/cm²/sec, soit un total de:

$$60 \times 60 \times 60 \times 10 \times 10^8 = 2,16 \times 10^{13}\ \text{neutrons/cm}^2$$

La plus forte exposition est encore 100 fois trop faible pour pouvoir altérer les galets.

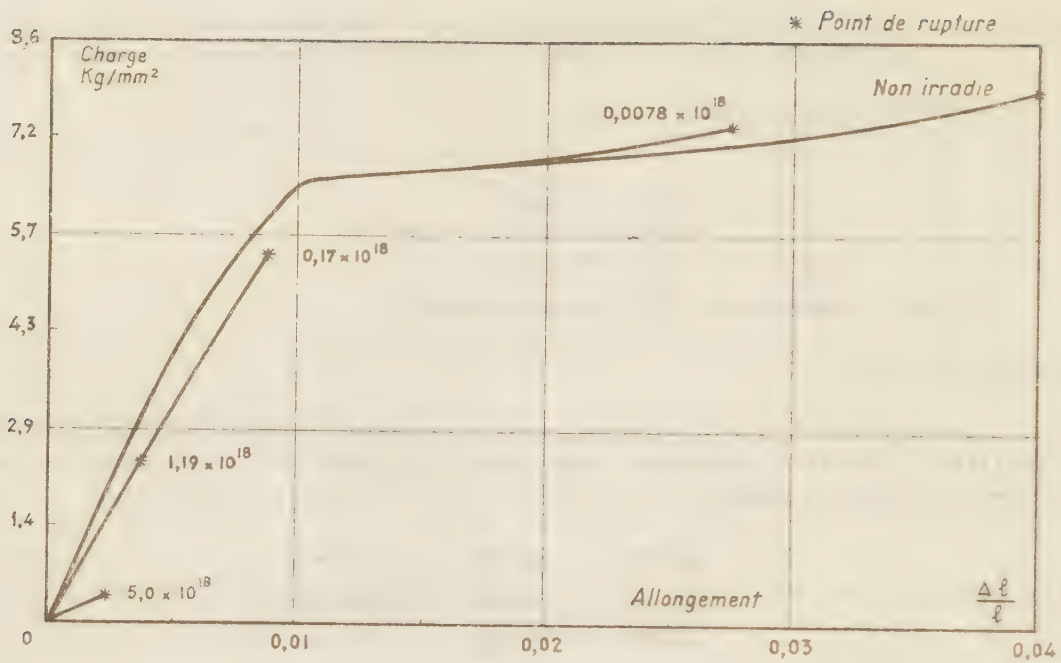


Fig. 84

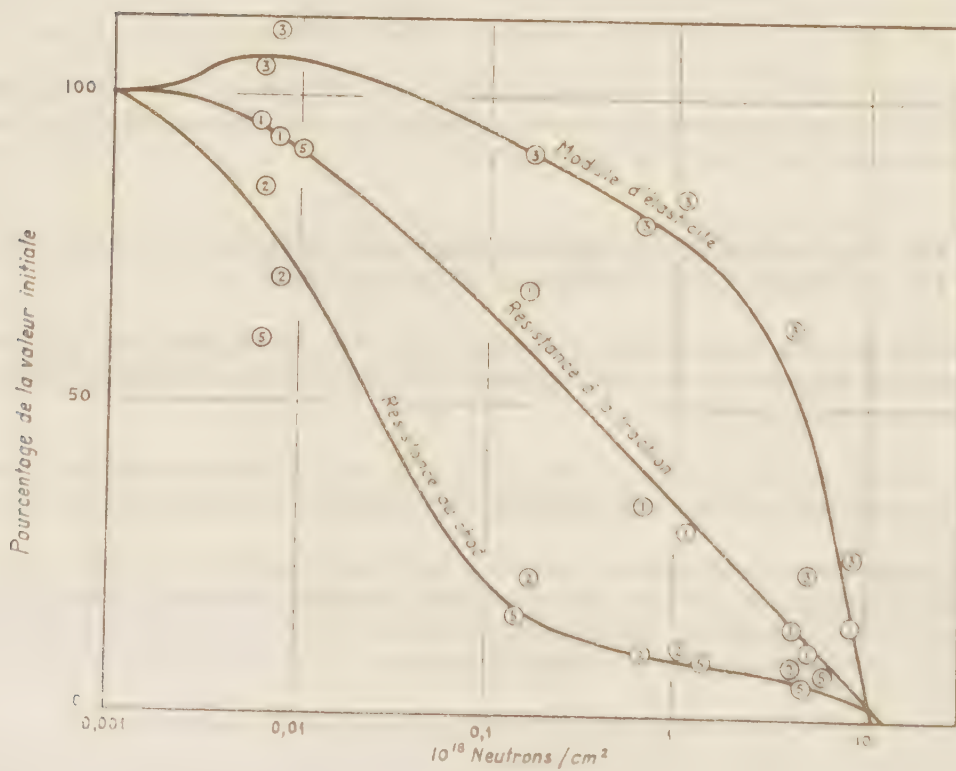


Fig. 85

14 - CONCLUSION -

Les essais préliminaires ayant été réalisés pour s'assurer de la viabilité de la méthode, on peut procéder à des essais systématiques sur les différents matériaux étudiés.

- CHAPITRE XV -

DETERMINATION DES USURES PAR LA METHODE DES TRACEURS RADIO-ACTIFS

I - DISPERSION DES RESULTATS -

Avant de commencer à étudier systématiquement les différents corps nous intéressant, il est utile pour nous de savoir dans quelle mesure les phénomènes réalisés sont reproductibles. Il nous faut donc étudier la dispersion donnée par cette méthode.

Dans ce but, on a utilisé 5 paires de galets en résines phénoliques stratifiées qui ont été introduits deux à deux dans la pile génératrice de neutrons lents. De cette façon, on pouvait les activer de la même manière pendant des temps identiques. On irradiait ainsi une paire de galets chaque jour.

En le retirant de la pile, on montait l'un d'eux sur la machine "Amsler" d'usure où il était soumis à une force radiale de 7,5 kg/mm, tout en baignant dans le bac à lubrifiant. Son compagnon était usiné superficiellement sur un tour, la poudre obtenue était pesée et mélangée à une quantité d'huile identique à celle utilisée pour lubrifier le galet. Après deux heures de marche, l'huile de graissage et l'huile témoin étaient mises dans des récipients de formes identiques. On mesurait les activités des deux huiles en rayons γ , à l'aide d'un compteur plongeur. L'huile d'usure était comptée près de 15 minutes après l'huile témoin. On introduisait alors un facteur correctif pour tenir compte de la décroissance de sa radioactivité pendant ces 15 minutes.

L'échelle de comptage était construite au Commissariat à l'Energie Atomique et le compteur avait les caractéristiques suivantes :

- Tension d'utilisation : 970 volts
- Palier : 100 volts
- Pente : 3,5 % pour 100 volts

La courbe de réponse, en fonction de la tension, pour un radio élément étalon est représenté dans la *Figure 86*.

Le rapport des chiffres obtenu pour les activités des huiles est égal au rapport des masses de plastiques contenues dans les deux huiles. Or, une de ces masses est connue on obtient donc l'autre très facilement.

Ces galets ont travaillé sur la machine pendant des temps égaux. On a fait 4 mesures sur chacun. Cet essai a été répété 5 jours de suite, dans des conditions de travail identiques. On a obtenu 5 courbes croissantes (*Figure 87*). La dispersion mesurée à la fin de ces courbes est de l'ordre de 20%. Cela peut sembler excessif quand on songe que l'on a eu 17% d'écart par les mesures diamétrales. En réalité, cela n'est pas énorme si l'on considère la complication de la mesure nécessitant deux récipients d'huile, deux mesures radioactives et une pesée.

COMPTEUR - TYPE B6 - F227

TENSION D'UTILISATION : 970 Volts
PALIER : 100 Volts
PENTE : 3,5 %
VÉRIFIÉ LE : 13 Nov. 1951

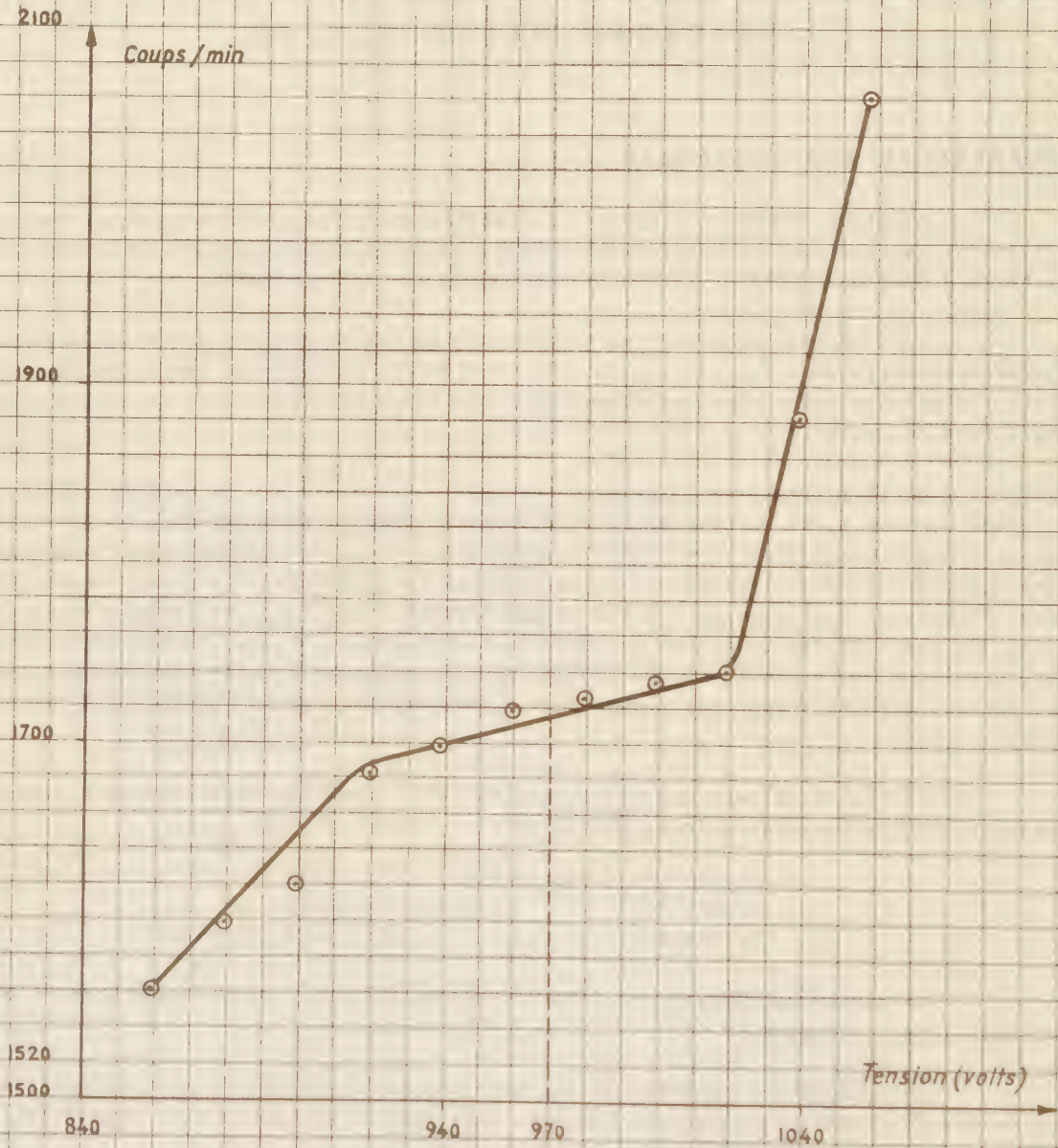


Fig. 86

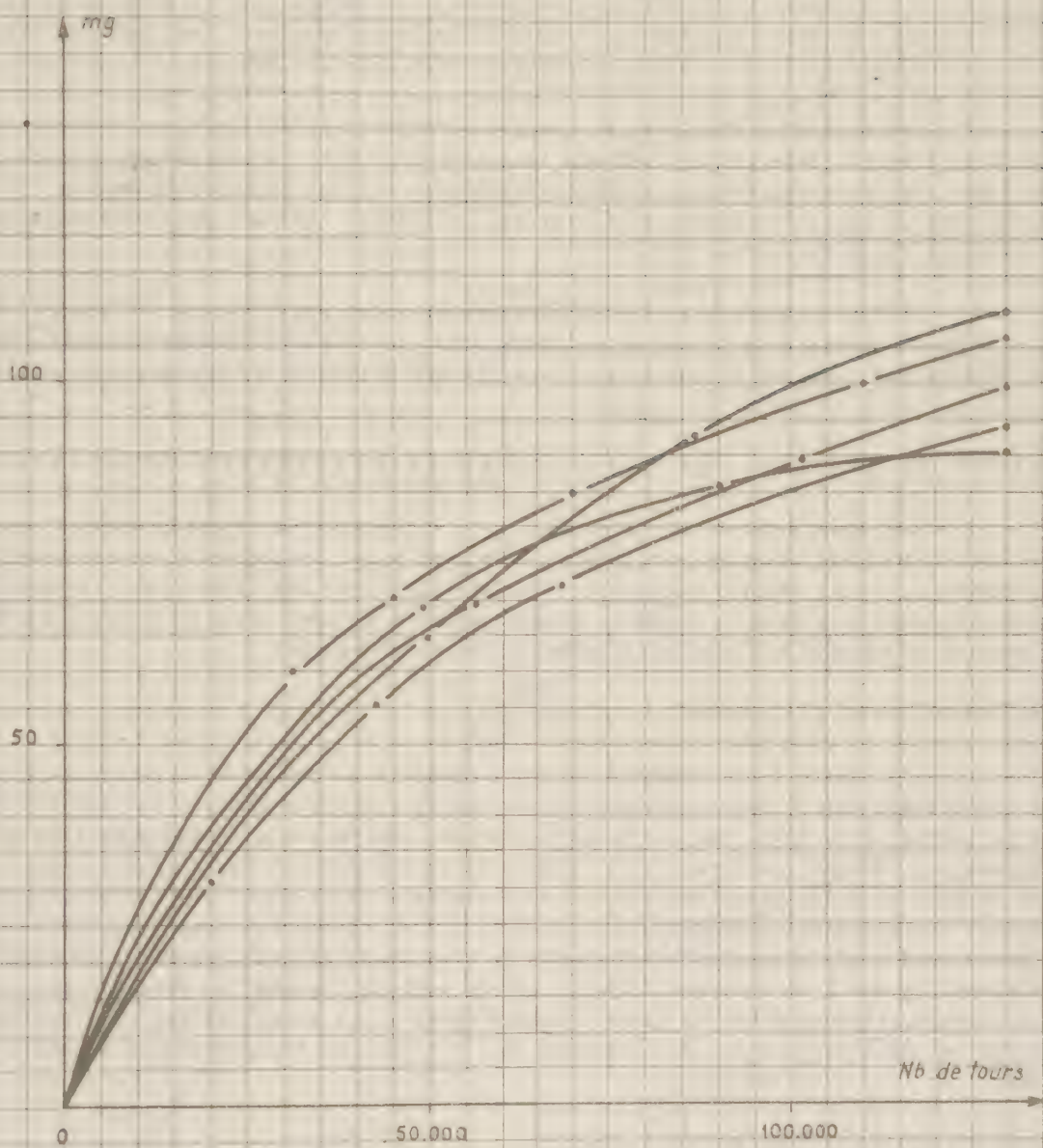


Fig. 87

La dispersion de 17% dans les mesures diamétrales avait lieu pour des usures très grandes, de l'ordre de 0,3 mm, alors que celle de 20% obtenue ici a lieu sur des usures beaucoup plus faibles, de l'ordre de 0,01 mm. Les usures aussi faibles auraient amené une dispersion de l'ordre de 30 à 40% avec les mesures diamétrales.

Le phénomène d'usure étant irrégulier et dispersif de par sa nature complexe, il est difficile de s'attendre à de meilleurs résultats, quelle que soit la méthode de mesure qui ne change rien au phénomène. Les isotopes radio-actifs nous apportent, en tous les cas, un moyen d'investigation extrêmement sensible qui nous sera d'un précieux secours.

Ces essais répétés nous ont permis de nous familiariser avec cette méthode de mesures. Son principal inconvénient est que le relevé d'un point d'une courbe d'usure demande trop de temps par suite des précautions nombreuses dont il faut entourer la mesure. Il s'écoule environ 45 minutes entre le moment où l'on arrête la machine "Amsler" pour relever un point et le moment où on la remet en marche.

Il faut prendre beaucoup de précautions pour ne pas fausser la mesure. Une propriété méticuleuse du compteur de Geiger et des appareils environnants est indispensable pour ne pas laisser traîner des traces d'huiles radioactives pouvant augmenter le mouvement propre du compteur.

2 - ETUDE DE L'USURE SUR LES PHENOLS FORMALDEHYDES "D 44 classe 2"

Les essais suivants ont eu pour but la construction de diagrammes d'usure. Les courbes ont été tracées avec, en abscisse le nombre de tours effectués et en ordonnée l'usure en milligrammes. Il est inutile de pousser l'essai plus loin car, d'une part la radio-activité des éprouvettes décroît avec le temps et d'autre part la détermination de l'usure par mesure des diamètres donne déjà des résultats après 24 heures de marche.

a - Roulement avec glissement -

Cet essai a été effectué dans des conditions identiques à celles du Chapitre V. Il est intéressant car il nous indique le mécanisme du phénomène d'usure pendant les premières heures de marche. On a tracé les courbes d'usure pour des forces radiales allant de 4 à 10 kg/mm (Figure 88) On voit nettement qu'il y a un début rapide de l'usure pendant les premières minutes de marche, puis, stabilisation. Cela se comprend facilement car la première phase de l'usure est un rodage des surfaces et une élimination de toutes les aspérités. Cette première phase correspond à une augmentation du couple de frottement qui est supérieur au couple de régime normal et que l'on remarque toujours sur la machine "Amsler" au début de chaque essai. Après ce rodage, l'usure prend sa forme linéaire normale. La partie de ces courbes tracée correspond au début des courbes de la figure 34 le moment où l'usure change d'allure n'apparaît pas.

b - Roulement sans glissement

Les essais ont été réalisés dans des conditions identiques à celles du chapitre VI. On a utilisé des charges allant de 4 à 10 kg/mm (Figure 89). Dans ce cas également on retrouve le même phénomène que dans la première étude. L'usure est plus forte pour le roulement pur que pour le roulement avec glissement.

L'interposition du film d'huile est la cause de la bonne répartition des pressions dans le cas du glissement. Ce résultat est une confirmation des hypothèses du chapitre VI.

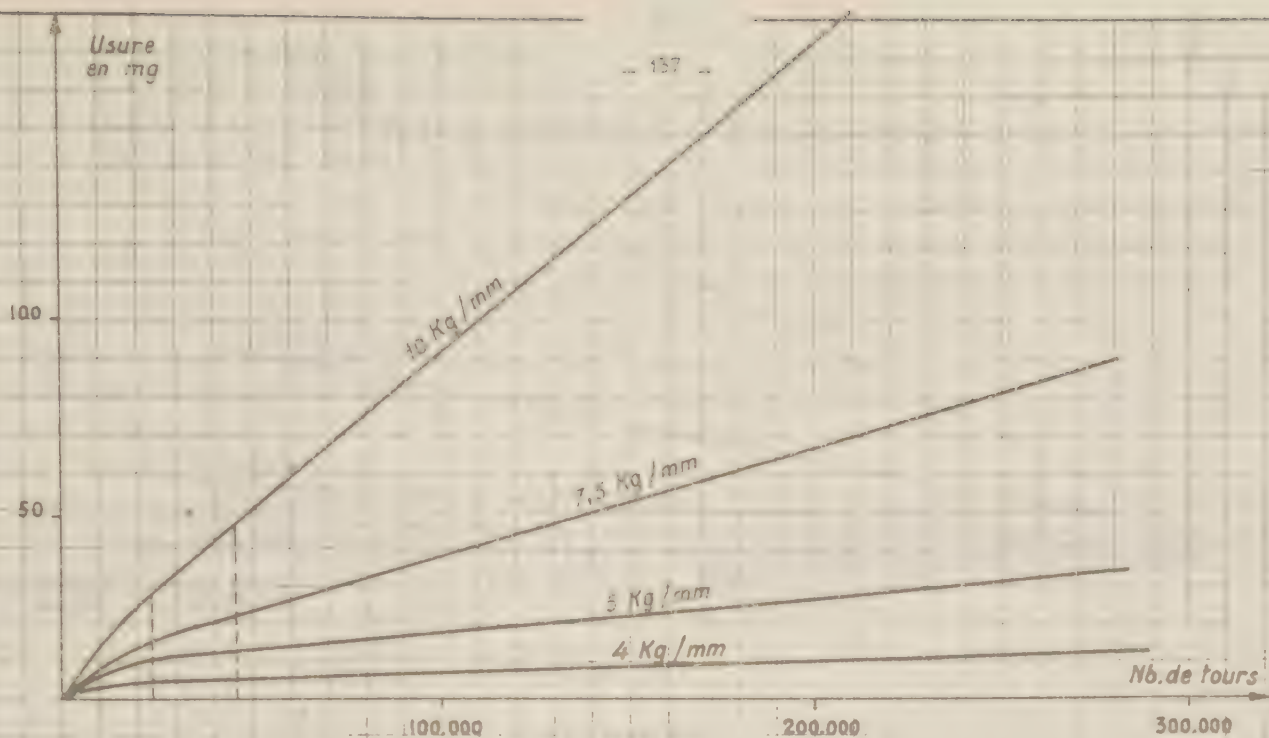


Fig. 88

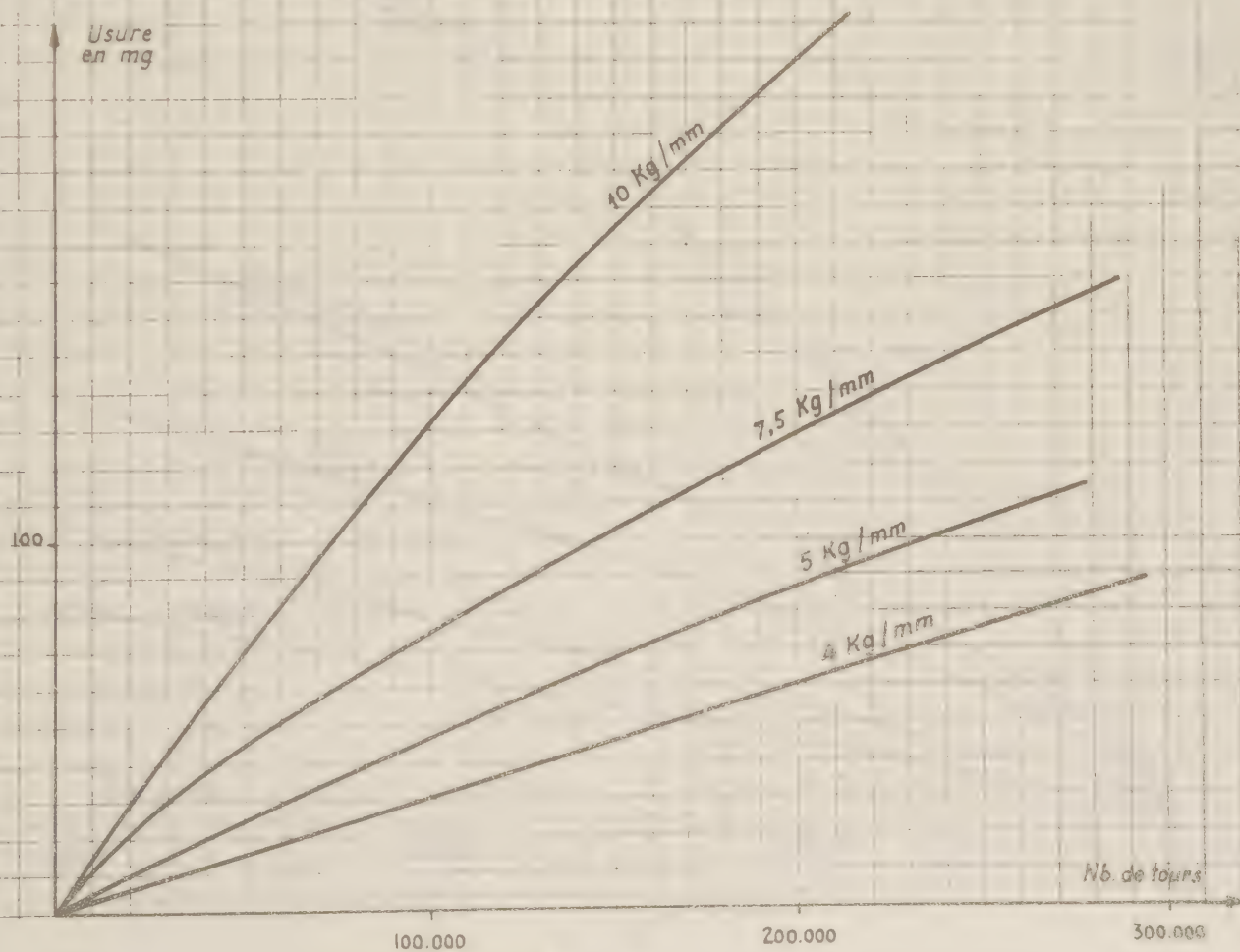


Fig. 89

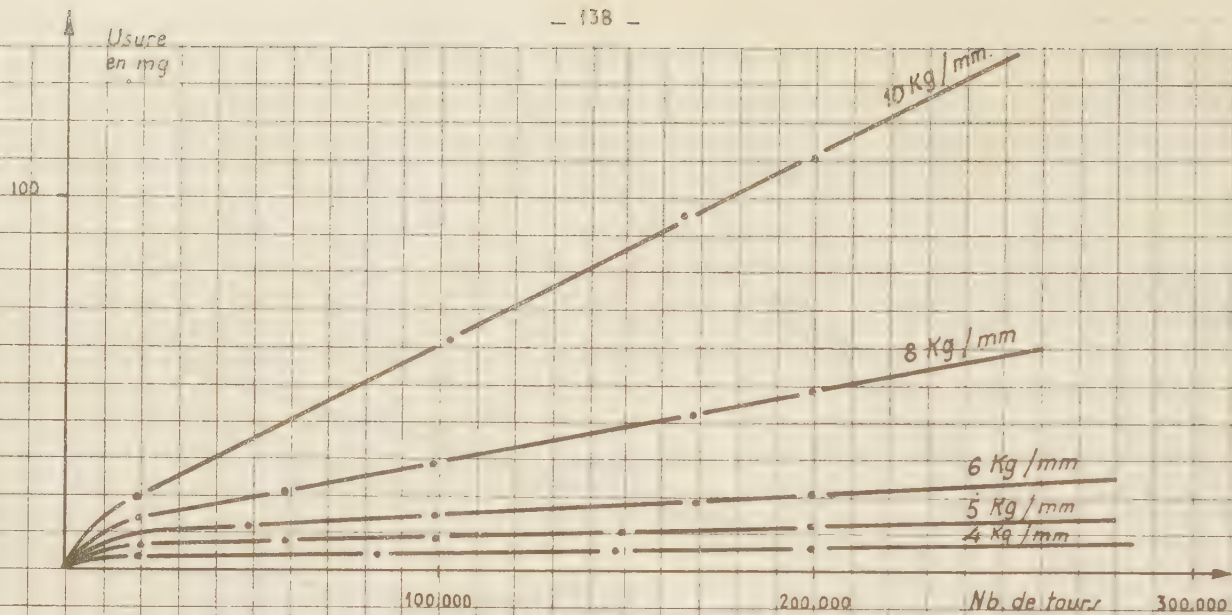


Fig. 90

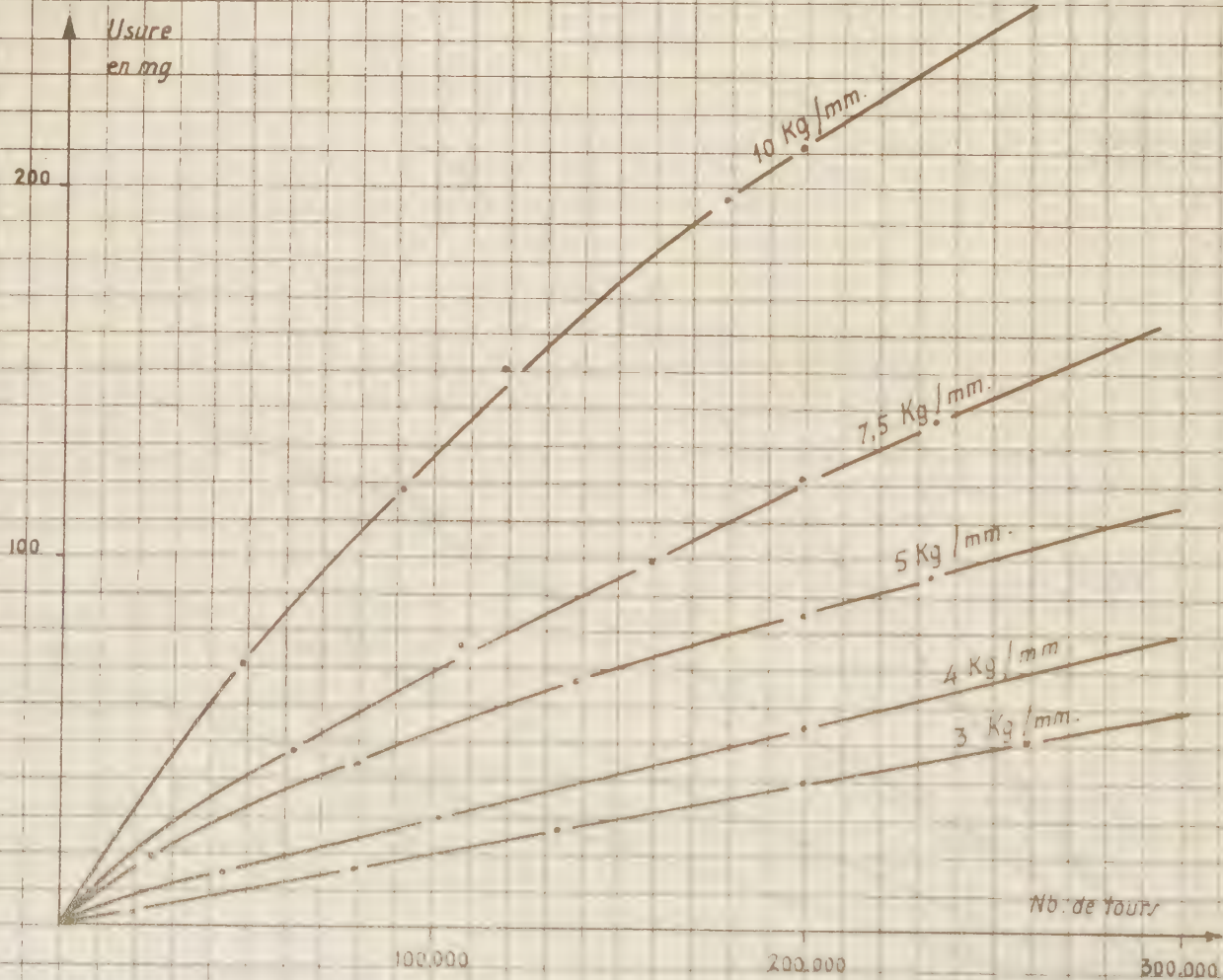


Fig. 91

3 - ETUDE DE L'USURE SUR LES PHENOLS FORMALDEHYDES A BASE DE FEUILLES DE BOIS

Les résines phénoliques à stratifications de bois qui ont été étudiées en dernier lieu, ont été soumises à l'action de la pile pour étudier leur comportement radio-actif. Un échantillon examiné a manifesté une activité très forte, bien supérieure à celle des autres stratifiés. L'étude de la courbe de décroissance de son activité a révélé la présence de chlorure de sodium. Le dosage de ce produit en a indiqué la proportion de 3 mg de Cl Na par g de plastique, beaucoup plus que les autres corps étudiés. Les mesures avec ces plastiques sont donc plus faciles.

Les essais d'usure ont été faits dans des conditions identiques à celles du chapitre VIII, pour les cas du roulement avec glissement (*Figure 90*) et sans glissement (*Figure 91*). La méthode de mesure s'est révélée dans les deux cas comme susceptible de donner des résultats intéressants.

- CHAPITRE XVI -

PERFECTIONNEMENTS APPORTES A CETTE METHODE

1 - POSSIBILITES D'ACCROITRE LA SENSIBILITE DES MESURES RADIO-ACTIVES -

Les mesures d'usure faites à l'aide des isotopes radio-actifs se sont révélées être très sensibles. Cependant, il ne faut pas oublier que leur sensibilité est liée à l'intensité du rayonnement émis par les galets. Or, celui-ci est très faible, de l'ordre de quelques micro-curies par gramme de matière plastique. Pour avoir une émission plus intense et, par conséquent, une mesure encore plus sensible, il faut augmenter la teneur en radio isotopes. Cela peut se faire par trois méthodes :

- a - Augmenter le temps d'exposition aux neutrons des échantillons. Celui-ci est déjà de 60 heures, soit 4 fois la période. Nous savons qu'un corps irradié atteint la saturation pour un rayonnement donné au bout d'un temps qui est de 3 fois la période environ. Au bout de ce temps, il se produit, en un instant donné, autant de désintégration que de formations d'atomes d'isotopes. Nous n'avons donc pas intérêt à laisser les pièces dans la pile plus longtemps.
- b - Augmenter l'intensité du rayonnement. Ceci n'est pas possible avec la pile de Fort-Chatillon. La courte période du sodium ôte la possibilité de l'envoyer irradier à l'étranger, à Harwell en Angleterre par exemple, comme on le fait pour d'autres isotopes.
- c - La troisième solution, la seule possible, est d'augmenter la teneur en Cl Na du plastique.

Les phénols formaldéhydes à base de tissu, utilisés dans ces essais, avaient une teneur de 1,15 mg de Cl Na par g. de plastique. Si on multipliait cette teneur par 3 ou 4 la méthode deviendrait 3 ou 4 fois plus sensible. Cette augmentation serait malgré tout trop faible pour altérer les propriétés mécaniques de la matière étudiée. Au total, on aurait une teneur de moins de 1% de sel.

2 - AUGMENTATION DE LA TENEUR EN SEL DU PLASTIQUE

L'augmentation de la teneur en Cl Na du plastique peut se faire de deux façons:

- a - En ajoutant du sel dans les résines synthétiques lors de la fabrication des planches de plastique stratifié.
- b - En immergeant les éprouvettes à essayer dans une solution de Cl Na et en attendant que l'imprégnation se fasse.

Les deux solutions sont possibles toutes deux. C'est la seconde qui a été employée car elle est la plus facile à exécuter et à contrôler. Les plastiques sont fabriqués à l'usine en grandes quantités et il est parfois difficile d'en distraire un peu du circuit

normal pour leur ajouter le sel indispensable à nos essais.

L'absorption d'eau salée par le plastique est assez lente. Il faut laisser les pièces immergées pendant 15 jours au moins pour avoir une forte teneur en Cl Na pendant l'essai. Cependant, avant d'employer cette méthode, un certain nombre de précautions sont à prendre.

3 - ESSAI DE REPRODUCTIBILITE DU PHENOMENE D'IMPREGNATION -

Cet essai a pour but de savoir si tous les échantillons de plastique absorbent la même quantité de sel et dans quelle mesure les résultats diffèrent entre eux. On plonge 4 galets de plastique dans une solution saturée de Cl Na à 20° pendant 15 jours; un 5^{ème} galet reste à l'air libre comme témoin. A la fin de la quinzaine, on retire les galets; on soumet les 5 galets à l'action de la pile pendant 60 heures. En mesurant par la suite les activités au compteur de Geiger, on obtient les chiffres suivants :

Premier galet non imprégné	:	4 189 coups/minute
Deuxième galet imprégné	:	14 544 coups/minute
Troisième galet imprégné	:	13 308 coups/minute
Quatrième galet imprégné	:	13 716 coups/minute
Cinquième galet imprégné	:	14 475 coups/minute

On voit que l'activité a plus que triplé par l'imprégnation de Cl Na, ce qui nous prouve qu'il y a possibilité de faire des essais bien plus précis que tout ce qu'on a entrepris auparavant.

La dispersion des résultats est de 7,1% entre les galets imprégnés de la solution de sel. Dans cette dispersion, il faut comprendre la dispersion due à la différence de poids et de forme des galets ainsi que les erreurs statistiques de comptage de l'ordre de 120 coups/minute.

4 - ETUDE DE L'IMPREGNATION EN PROFONDEUR -

Il est très important de voir la façon dont a pénétré le sel à l'intérieur du plastique. Pour que les galets imprégnés puissent être utilisés à l'étude de l'usure, il faut avoir, tout au moins, à la surface, une couche de teneur homogène dans laquelle la quantité de sel est proportionnelle au volume, comme il en était le cas avant l'imprégnation.

Pour étudier la profondeur de la pénétration du sel, on a pris les galets étudiés précédemment. On leur a enlevé au tour 10 couches successives de 1/10° de mm chacune. Les copeaux en fine poudre de ces 10 passes successives ont été recueillis dans des coupelles séparées. On a pesé ces poudres et on a mesuré leur radio-activité. L'activité totale divisée par la masse nous donne l'activité spécifique du plastique pour chaque dixième de millimètre et, par conséquent, la teneur en sel jusqu'à 1 mm de profondeur. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le tableau suivant (page 143).

Cette activité spécifique mis en abscisse sur une courbe ayant pour ordonnée la profondeur de la couche nous a donné une courbe très régulière représentant la décroissance saline à l'intérieur du plastique. Cette courbe tend asymptotiquement vers une parallèle à l'axe

N° DE LA COUCHE	ACTIVITE TOTALE c/m	MASSE mg	ACTIVITE SPECIFIQUE cè/m	TENEUR EN Cl Na mg par g
1	4 685	97,6	48	7,9
2	4 659	97,1	48	7,9
3	4 682	116,1	41	6,6
4	3 383	105,6	32	5,2
5	2 474	103,4	24	3,9
6	1 981	105,5	19	3
7	1 301	106,2	12	2
8	951	100,6	9	1,4
9	849	113,2	7	1,15
10	740	111,4	7	1,15

des y qui représente l'activité due à la teneur naturelle du plastique en sel. Celle-ci étant de 1,15 mg de Cl Na par gramme de plastique, un simple calcul nous indique qu'à la surface on a une teneur de 8 mg de Cl Na par gramme de plastique, ce qui est le résultat le plus intéressant à connaître. La figure 93 nous donne la même courbe avec en ordonnée, la teneur en sel des différentes couches étudiées.

La courbe de la figure 92 nous indique qu'il y a une zone de près de $2/10^{\circ}$ de mm dans laquelle la teneur en sel est à peu près homogène, correspondant à 9,5 coups/m/mg. Pour s'assurer de cette constance à la surface, on a repris le lendemain un autre des galets imprégnés on lui a enlevé au tour des couches de plastique de $25/100^{\circ}$ de mm sur $2/10$ mm. Les activités spécifiques ont été portées sur la figure 92; elles sont naturellement inférieures à celles de la veille à cause de la décroissance de l'activité dans le temps; on a obtenu la petite courbe AB qui est bien verticale, indiquant bien que la teneur en sel est homogène dans cette profondeur.

Il y a donc possibilité d'étudier l'usure avec une plus grande précision en utilisant cette méthode d'imprégnation.

Les usures auxquelles on aboutit ne dépassant jamais $2/10^{\circ}$ de mm d'épaisseur, on sera certain d'être tout le temps dans une zone où l'élasticité sera proportionnelle à la masse de plastique. C'est le but qu'on se proposait d'atteindre.

5 - INTERET DE CETTE ETUDE DE L'IMPREGNATION -

Il est important de noter, que cette mesure faite constitue une méthode générale d'étude de l'imprégnation de n'importe quel corps ayant une certaine porosité, par une solution à base de sel métallique. On a ainsi un procédé élégant permettant de mesurer l'imprégnation en sel à n'importe quelle profondeur. Cela peut avoir une certaine importance dans les industries à base de bois, textiles, matières poreuses, etc ... Dans le cas où l'entrée de la solution dans la matière se fait par simple capillarité, la teneur en eau sera proportionnelle à celle en sel,

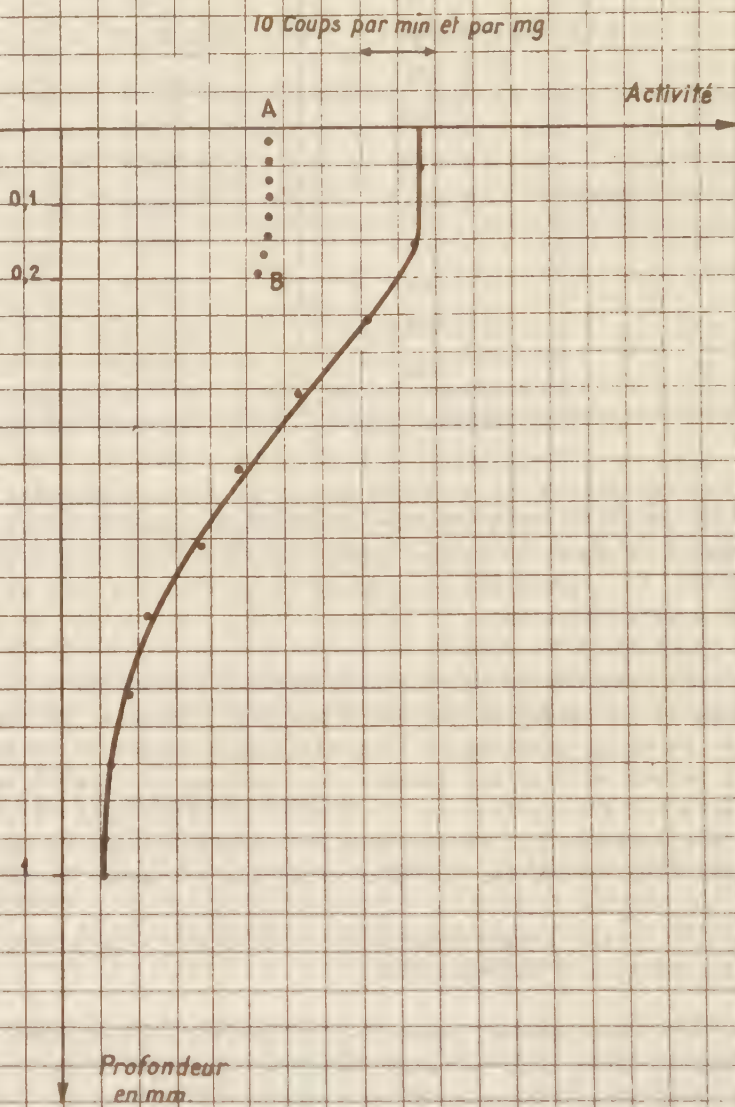


Fig. 92

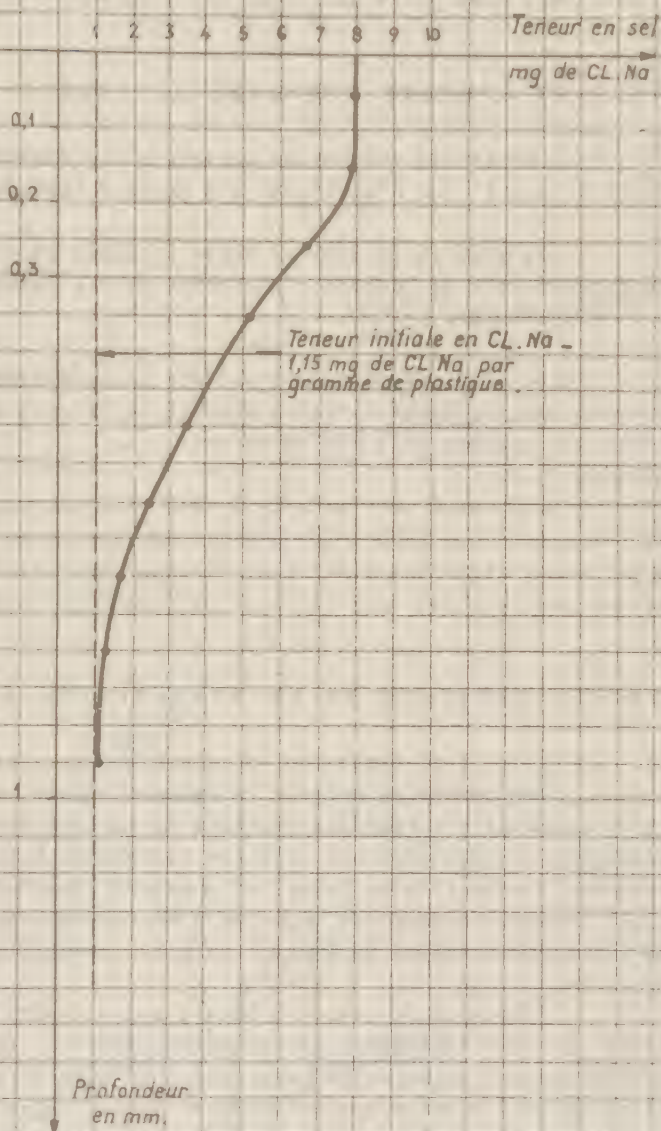


Fig. 93

comme c'est sans doute le cas pour les essais effectués sur les plastiques. Dans le cas où l'absorption d'eau se fait par osmose, la teneur en sel suit une loi différente. Cela fait tout un sujet d'études qui peut aboutir à d'intéressantes conclusions. L'étude des phénomènes d'absorption par les plastiques a été faite d'une façon générale en déterminant l'augmentation de masse d'un échantillon qui a séjourné pendant un certain temps dans un liquide. Cette étude de l'absorption par les isotopes radioactifs peut nous donner des précisions sur la loi de l'absorption en profondeur. Elle sera très utile pour définir la perméabilité de ces matériaux.

6 - ETUDE DE L'USURE A L'AIDE DE GALETS IMPREGNES DE SEL -

L'étude des phénomènes d'usure a été reprise à l'aide de galets en phénol formaldéhyde "D 44 classe 1" qui n'avait pas été employé lors des essais du précédent chapitre.

Les mesures se sont révélées beaucoup plus sensibles qu'auparavant; elles ont donné lieu à deux réseaux de courbes : roulement avec glissement (*Figure 94*) et roulement sans glissement (*Figure 95*).

Les points des courbes ont été plus rapprochés que dans les essais précédents; une demi-heure à trois quart d'heure étaient suffisants pour avoir une usure appréciable. On obtient donc des courbes plus précises.

Le procédé utilisé pour obtenir les courbes était identique à celui des essais précédents mais avec des galets qui avaient été auparavant plongés pendant 15 jours dans une solution saline. L'étude des propriétés mécaniques du matériau employé que nous avons faite nous a montré que le plastique utilisé n'est pas modifié si on le plonge dans l'eau.

7 - LIMITES EXTREMES DE LA SENSIBILITE DE LA METHODE RADIOACTIVE -

Il est intéressant de se rendre compte jusqu'à quelle limite, la radioactivité superficielle, nous permet de pousser la recherche dans le domaine de l'usure des plastiques. Dans ce but, un galet en plastique imprégné de sel a été monté sur la machine "Amsler" où il a tourné pendant 5 minutes sous une pression radiale de 4 kg/mm, animé d'un mouvement de roulement avec glissement. Au bout de ce temps, on a mesuré l'usure du galet par comparaison du lubrifiant dans lequel il baignait avec une quantité d'huile identique contenant une quantité connue de poudre de plastique imprégné et irradié dans des conditions identiques à celles du galet.

L'huile de graissage a décelé une activité de 105 coups en 5 minutes de comptage. A ce chiffre, il faut retrancher le mouvement propre du compteur qui est de 75 coups en 5 minutes. Il reste 30 coups en 5 minutes d'activité due à l'usure. L'huile témoin contenait 72,7 mg de poudre plastique qui a donné une activité de 30 442 coups en 5 minutes. D'où la masse de plastique usé qui est de 0,072 mg soit 72 millièmes de gramme. C'est apparemment l'extrême limite à laquelle on peut aller dans l'étude d'un phénomène d'usure.

Remarque :

Il serait cependant hasardeux pour l'étude d'une mesure d'extrapoler le résultat obtenu. Il est peu probable qu'en multipliant par 12 le nombre obtenu on aboutisse à l'usure horaire et ensuite à l'usure par jour en le multipliant par 24. Il ne faut pas oublier que l'usure est un phénomène statistique. Rien ne nous dit qu'elle est toujours la même en des temps égaux très petits, même si la couche obtenue finalement est rectiligne. Cet essai a été effectué

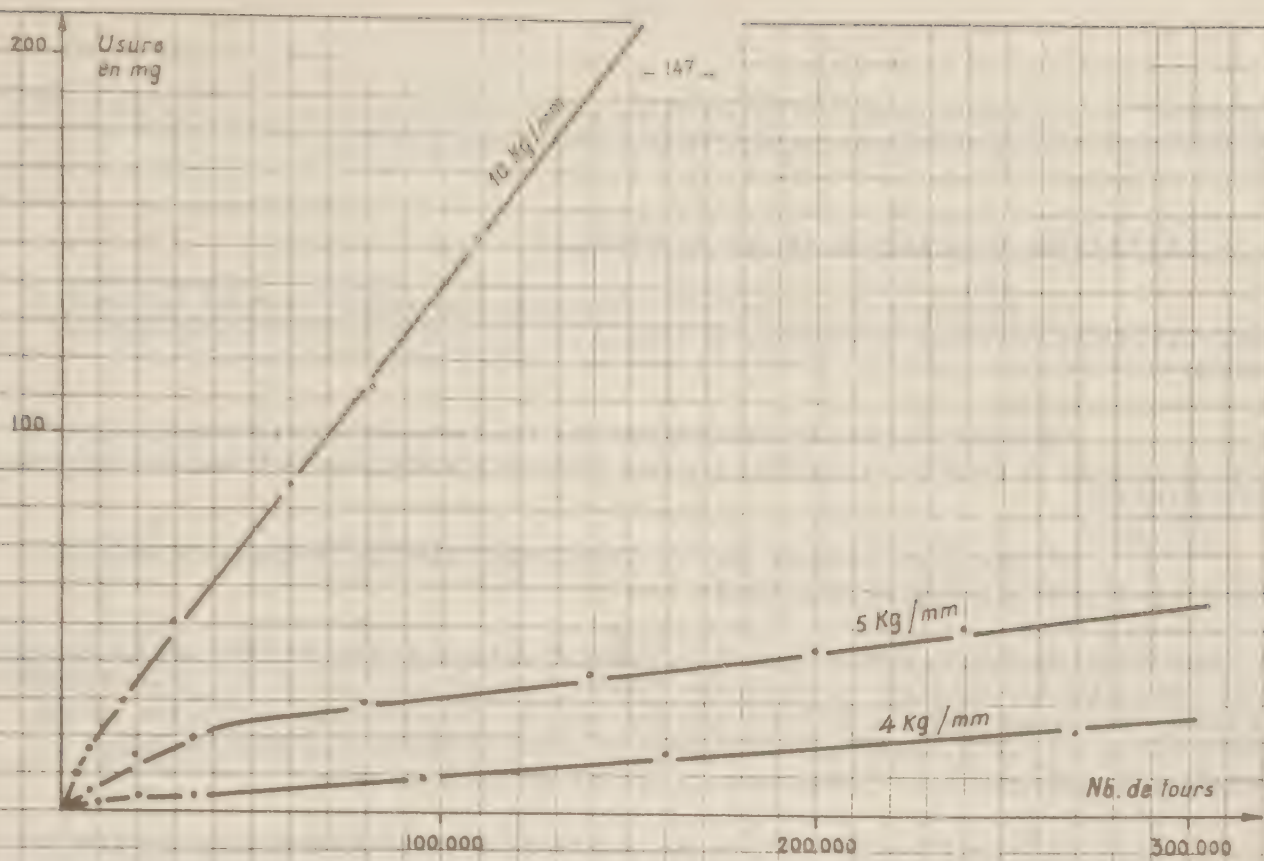


Fig. 94

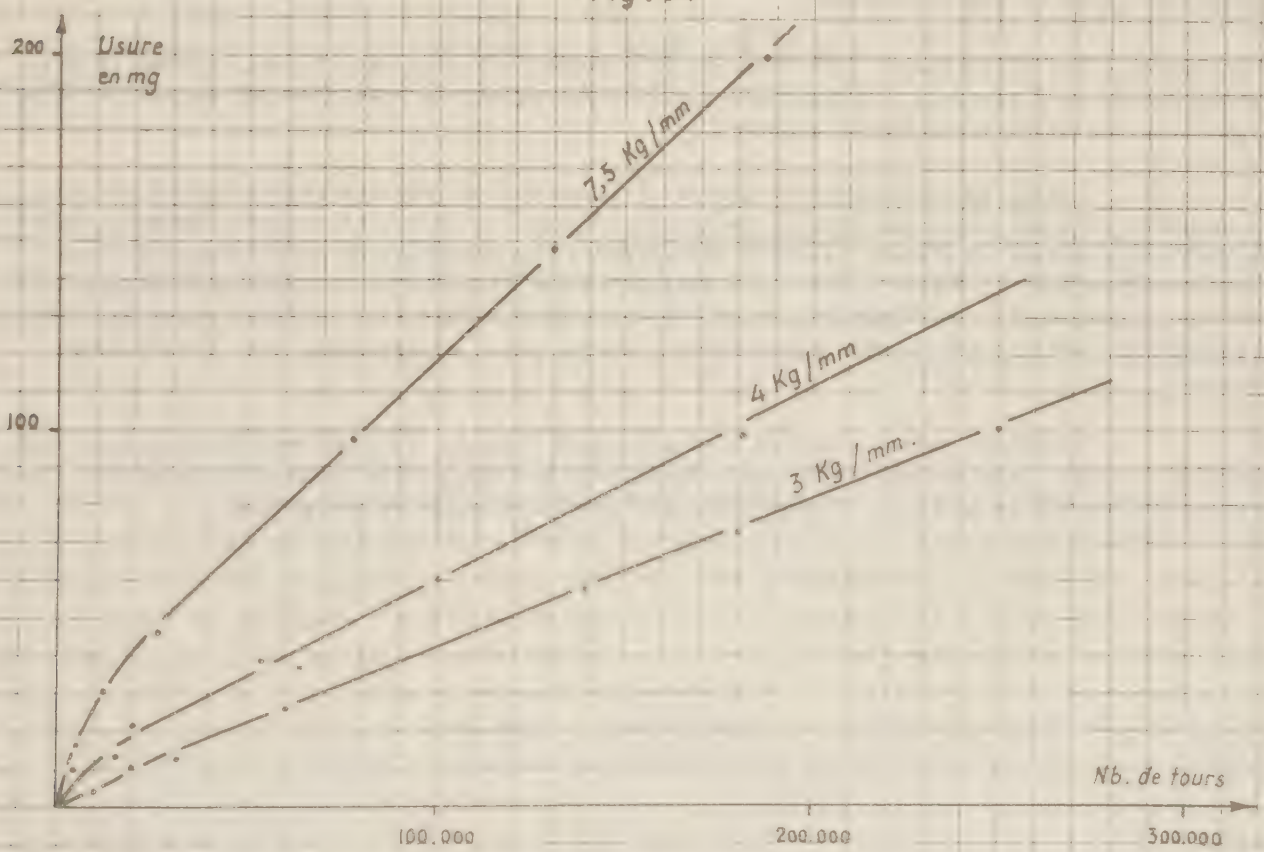


Fig. 95

uniquement pour se rendre compte des possibilités que la radioactivité artificielle offre dans le domaine de l'étude de l'usure; vouloir le généraliser serait faux.

8 - TENTATIVE DE PREVISION DE L'USURE -

Les fabricants et utilisateurs d'engrenages sont particulièrement intéressés à avoir des règles permettant la prévision de l'usure des engrenages avec une probabilité de vérité.

Toute construction de pièces mécaniques est basée sur une évaluation approximative de sa durée de service. Le problème est donc particulièrement important pour les engrenages en plastiques.

Un essai a été effectué pour se rendre compte dans quelle mesure la prévision était possible. On a procédé en deux temps :

a - Deux galets de phénols formaldéhyde "D 44 classe 2" ont été activés en même temps à la pile l'un d'eux a été ensuite placé sur la machine "Amsler" dont on avait auparavant enlevé l'échelle graduée des forces radiales. On lui a donc appliqué une force inconnue et il a été usé pendant 3 heures 1/2, en roulement avec glissement; il a fait 24 000 tours pendant ce temps. La méthode de mesure utilisant le galet témoin a indiqué une usure de 28 mg.

En se reportant à la figure 88, on remarque que le diagramme d'usure laisse prévoir une force radiale aux environs de 10 kg et une usure de 50 à 55 mg à la fin des trois heures suivantes de fonctionnement.

b - L'essai a été fait pendant trois heures. On a obtenu une usure de 49.1 mg. L'échelle des forces remise en place nous a indiqué une force de 9,4 kg/mm. La prévision qui ne pouvait être rigoureuse est assez bonne dans l'ensemble.

Cette tentative de prévision de l'usure est au fond une extrapolation et, par conséquent, elle est assez dangereuse. Cependant, il faut la faire. L'industrie demande toujours un ordre de grandeur de l'usure avant d'entreprendre une construction et il appartient aux expérimentateurs de le fournir. Alors que dans certaines branches de la technique employant des sciences rigoureuses la détermination de cet ordre de grandeur peut se faire entre des limites très serrées, dans le cas de phénomènes comme l'usure, elle se fera avec des limites assez larges.

Quand on aura à calculer un engrenage à l'usure, le diagramme d'usure nous indiquera quelle est l'usure maxima qu'on peut avoir pour une contrainte donnée. On calculera l'engrenage de façon à ce qu'il ne dépasse cette contrainte en aucun de ses points.

. E .

C O N C L U S I O N S

- CHAPITRE XVII -

METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE DES ENGRENAGES A L'USURE

I - NECESSITE DE CE CALCUL -

L'étude que nous venons de faire sur l'usure des engrenages par l'intermédiaire de galets travaillant dans des conditions identiques à celles des dentures, serait incomplète si elle ne prenait pas ce caractère de généralité propre à tout travail scientifique. Nous avons travaillé sur des galets représentant des points particuliers de profils d'un engrenage particulier. La question qui se pose tout naturellement est de savoir comment de pareils résultats pourront être étendus à une denture quelconque de n'importe quel engrenage en matière plastique.

Nous pouvons répondre à cette objection que le procédé utilisé est le seul présentant des garanties de généralisation possible et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il a été employé.

a - Procédé de mesure directe -

Nous avons vu au chapitre I (page 7) la méthode Opitz et Hesse de mesure de l'usure des engrenages en matière plastique. On les montait sur une chaîne cinématique fermée. Cette méthode peut donner une indication globale du phénomène mais ne nous montrera pas les usures maximales, les meilleures conditions de travail ainsi que les plus défavorables.

Les méthodes de mesure de l'usure laissent également à désirer. Les auteurs distinguent l'usure absolue qui est la distance du profil initial et l'usure relative quotient de l'usure absolue par l'épaisseur de la dent. Cependant, les usures étant différentes en chaque point du profil, on ne voit pas très bien le moyen de donner la distance du profil usé au profil initial, ni la valeur de cette mesure comme critère de l'usure.

C'est ce procédé qui ne présente aucune garantie de généralisation car si on a étudié l'usure d'un engrenage de module M et de n dents, on ne peut, à priori, dire comment les résultats obtenus s'étendent à un engrenage de module M' et de n' dents.

En bref, le défaut principal de cette étude c'est qu'elle envisage le phénomène d'usure synthétiquement dans toute sa complexité géométrique, cinématique et dynamique. Une étude globale d'un phénomène physique, si elle n'est pas précédée d'une analyse des facteurs rentrant en jeu, reste toujours dans le domaine de l'empirisme.

b - Utilisation de galets :

Ce procédé, qui a été employé plusieurs fois, présente l'avantage immense de simplifier le problème, d'en diminuer beaucoup le nombre de variables et, par conséquent, de permettre une généralisation. L'étude d'un point particulier de la denture où les conditions sont les plus défavorables nous donnera des indications qui nous seront utiles car elles sont simples et se rapprochent de la théorie.

L'étude de la résistance à la traction d'une bielle d'automobile, faite d'un acier nouveau, débutera toujours par un essai de traction sur une éprouvette normalisée de ce métal; la résistance des matériaux nous indiquera ensuite quels sont les efforts maxima que pourra supporter l'éprouvette. On n'étudiera jamais la résistance à la traction du nouvel acier par une rupture provoquée, de la bielle elle-même.

Il en est de même ici; l'étude de la résistance à l'usure de l'engrenage sera faite à l'aide des galets circulaires. La théorie des engrenages nous indique comment appliquer ces résultats à un engrenage quelconque. Il serait absurde d'étudier la résistance à l'usure du plastique employé, à partir d'un engrenage fonctionnant sous charge. La simplification de l'expérience est, comme on le voit, la seule garantie de généralité.

2 - CHARGES D'ENDURANCE LIMITEES -

Les essais effectués nous ont permis de déterminer un certain nombre de charges d'endurance limites pour les matériaux utilisés.

MATERIAU UTILISE	CHARGE D'ENDURANCE LIMITE	
	Roulement avec glissement	Roulement sans glissement
D 44 classe 2	4 kg/mm	3 kg/mm
D 44 classe 1	3 kg/mm	2,5 kg/mm
Feuilles de bois	4 kg/mm	3 kg/mm

Ce tableau de chiffres doit nous permettre de calculer le couple maximum admissible pour un engrenage quelconque dans une des ces 3 matières étudiées.

3 - CALCUL DU COUPLE MAXIMUM -

a - Cas de l'engrenage étudié

Nous avons vu au chapitre IV (p. 47 à 49) comment la formule de Hertz permettait de passer des galets à un engrenage quelconque. Cette formule est :

$$\sqrt{\sigma} = 0,59 \sqrt{\frac{PE}{r}}$$

Il faut que la contrainte $\sqrt{\sigma}$ soit la même dans le galet et dans l'engrenage, ou bien :

$$P_1 = \frac{P_1}{r_1} = \frac{P_2}{r_2}$$

l'indice 1 étant réservé au galet, l'indice 2 pour l'engrenage. Connaissant P_1 charge d'endurance limite, r_1 et r_2 , on détermine P_2 , force maxima à ne pas dépasser sur la ligne d'action de l'engrenage.

Une difficulté avait eu lieu dans la détermination de r_2 , rayon de courbure moyen pour l'engrenage; celui-ci varie si on se place sur le primitif ou à l'extrémité de la partie utile de la ligne d'action. Le calcul (Chap. IV, p. 48 à 49) nous avait donné deux valeurs de r_2 et, par conséquent, deux valeurs de P_2 . L'expérience nous a prouvé que, par suite de l'interposition du lubrifiant, les contraintes et les usures sont maxima au primitif et non aux extrémités; on n'utilisera donc, par la suite, que la seule formule obtenue à partir du point de contact des cercles primitifs. On a donc :

$$P_2 = \frac{P_1 M \sin \varphi}{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

Pour l'engrenage étudié (figure 32), on a :

$$P_1 = \frac{P_2}{r_1} = \frac{3}{22,4} = 0,13$$

$$M = 2,5 \quad \varphi = 20^\circ \quad n_1 = 50 \quad n_2 = 55$$

$$P_2 = 3 \text{ kg/mm sur la ligne d'action.}$$

Pour l'engrenage de rayon 68,7 mm et 20 mm d'épaisseur, cela donne :

$$3 \times 68,7 \times 20 = 4112 \text{ mm/kg}$$

soit 4,1 m/kg comme couple limite acceptable.

b - Cas d'un engrenage quelconque

Si nous prenons par exemple un engrenage du même matériau de module 10, ayant 30 dents et travaillant avec un engrenage en acier de 20 dents, cela nous donne comme charge :

$$P = \frac{0,13 \times 10 \times \sin 20^\circ}{\frac{1}{20} + \frac{1}{30}} = 5,3 \text{ kg/mm sur la ligne d'action}$$

D'où le couple, en supposant que la largeur de denture est de 30 mm :

$$C = 5,3 \times 150 \times 30 = 23850 \text{ mm/kg}$$

soit 23,8 m/kg comme couple maximum acceptable. On voit qu'il est assez important.

4 - METHODE DE PREVISION DE L'USURE

Dans le cas où l'on possède un engrenage prototype dont on veut étudier la résistance à l'usure en vue d'une fabrication en série, il sera facile de procéder comme on vient de le voir.

Dans le cas où l'on étudie une matière plastique inconnue, l'utilisation de galets ayant les rayons de courbure des dentures au point primitif nous permettra de tracer les courbes d'usure et de déterminer la charge d'endurance limite.

L'utilisation des isotopes radioactifs permettra d'avoir une mesure plus précise et plus rapide; les essais pourront être beaucoup plus courts.

L'état de surface des galets nous indiquera dans quelle mesure l'usure qu'on a obtenue est normale ou non; il confirmera les mesures et les courbes obtenues.

La charge d'endurance limite, une fois déterminée, nous donnera, par le calcul, le couple à appliquer pour avoir une usure normale.

5 - CONDITIONS D'USURE MINIMUM -

La durée de la vie des engrenages en matières non métalliques varie dans de très larges limites.

On a vu certains engrenages en bois, de moulin à eau ou de la noria d'Afrique, tenir pendant près d'un siècle sans s'user. Par contre des engrenages taillés avec précision dans un plastique fabriqué avec soin s'usent en des temps records.

Ces différences considérables sont dues au fait que, dans un cas comme dans l'autre le hasard a tenu une place considérable dans la détermination des dimensions; l'étude scientifique de l'usure n'a pas été entreprise.

Le travail qui a été fait ici essaye de contribuer à enlever une partie de cette indétermination. Il n'a pas pour but d'éviter l'usure et d'arriver à des engrenages inusables, ce qui serait un non sens.

Ce qu'il peut nous donner c'est quelques directives permettant de diminuer l'usure et surtout des limites supérieures de charges appliquées à ne pas dépasser. Ce qui cause le plus d'ennuis aux utilisateurs d'engrenages, ce n'est pas le fait que l'engrenage s'use mais c'est que, dans certains cas, il s'use d'une façon catastrophique. Nous ne chercherons donc pas à éviter l'usure normale mais plutôt celles qui sont accidentelles, le plus souvent dues à des sous estimations des différents facteurs pouvant causer l'usure.

Les conditions d'usure minimum seront donc :

- a - Utilisation d'un lubrifiant assez visqueux pour mieux répartir la contrainte due à la charge. La formation du film d'huile diminuera beaucoup l'usure par glissement.
- b - L'état de surface de l'engrenage métallique devra être le meilleur possible. Son usure étant très faible, ses aspérités ne seront pas rodées pendant la marche. S'il est rugueux, les engrenages en plastique s'useront plus vite.
- c - Il ne faut, en aucun cas, dépasser les contraintes et les couples limites que nous indique le calcul; il serait bon de les employer avec une certaine marge de sécurité à ne pas dépasser. Cette marge est rendue nécessaire par les possibilités de différences dans le plastique employé.

- CHAPITRE XVIII -

APPRECIATION SUR LES DIFFERENTES METHODES ETUDIEES

1 - INTERET DES METHODES EXPERIMENTALES UTILISEES -

Le travail qui a été fait n'a pas pour but d'être un guide général pour le technicien fabriquant ou utilisant les engrenages en matières plastiques. C'est la raison pour laquelle il ne contient pas de tableaux complets de toutes les caractéristiques mécaniques des plastiques utilisables pour la fabrication d'engrenages. Il ne contient pas non plus d'abaques ou de chiffres indiquant le calcul à l'usure de tous les engrenages qu'on emploie industriellement.

Le travail qui a été fait a eu surtout pour but de mettre au point des procédés rationnels d'étude de l'usure, d'en étudier les lois dans différents cas et de trouver des méthodes permettant d'aboutir aux chiffres indispensables aux techniciens. L'application de ces méthodes, dans chaque cas et pour chaque matière, permet d'avoir les charges d'endurance limites et de prévoir l'usure d'un engrenage. Il importe donc d'en faire la critique dans une courte rétrospective.

2 - METHODE DES MESURES DIAMETRALES -

La méthode des mesures de différences de diamètre a été longuement appliquée. Elle possède un certain nombre de défauts, spécialement la trop grande imprécision des résultats d'essais et la dispersion trop forte.

Elle nous a cependant rendu de grands services car c'est par elle que l'étude systématique de l'usure a été commencée. C'est par cette méthode que les charges d'endurance limites ont pu être trouvées. La méthode des différences de diamètres était imprécise, au début des courbes d'usure, mais devenait bien meilleure au bout d'un certain temps de fonctionnement. La description du phénomène d'usure et le changement brusque d'allure des courbes ont pu ainsi être mis en évidence.

Cependant, cette méthode reste sujette à de multiples possibilités de perfectionnements. Une étude plus détaillée de l'état de surface nous permettra de mieux définir le contour du galet après usure; des procédés de mesure des diamètres encore plus précis augmenteront la précision de la lecture et, par conséquent, diminueront les dispersions des essais. Un plus grand nombre de mesures de diamètres sur de nombreux repères permettra d'obtenir une valeur moyenne du diamètre encore plus proche de la probabilité maximum.

3 - MESURES DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET DES CONDITIONS DE CONTACT -

L'étude de l'élasticité des matériaux employés nous a permis de fixer des chiffres pour les principales grandeurs caractérisant un matériau du point de vue mécanique. Il

serait faux de vouloir considérer ces chiffres comme absolument rigoureux. Nous savons que pour les matières plastiques, des variations même légères dans la fabrication ou le degré de polymérisation sont suffisantes pour transformer les constantes caractérisant le matériau. Néanmoins, ces chiffres constituent pour nous des points de repère et des ordres de grandeurs. Ce qui est plus important, c'est qu'ils nous permettent de rattacher les phénomènes d'usure au reste de la résistance des matériaux, ceci grâce aux essais de contraintes répétées.

L'étude des conditions de contact des dentures jointes à cette étude de l'élasticité nous a permis d'essayer d'analyser le phénomène d'usure. Au lieu de le considérer globalement, comme la plupart des expérimentateurs l'ont fait, on a tenté d'étudier les contraintes dans la zone de contact qui, par leur valeur excessive, provoquent des ruptures et amènent l'usure. Cette analyse microgéométrique du phénomène était indispensable pour essayer de trouver les lois de l'usure.

Les méthodes modernes d'analyse des contraintes (jauges à fil résistant photoélasticité) nous ont été d'un grand secours pour contourner les difficultés théoriques de détermination des efforts au passage d'un point de l'engrenage dans la zone de contact.

4 - METHODE DES TRACEURS RADIOACTIFS -

L'utilisation des méthodes nouvelles ultra-sensibles de la radioactivité artificielle nous a conduit à une étude détaillée du phénomène d'usure à ses débuts.

Son principal défaut a été la trop grande dispersion des résultats. Elle est due en partie, à l'usure elle-même, en partie à la multiplicité des mesures et des opérations qui amènent forcément à l'addition des erreurs partielles. Son autre défaut a été la trop grande lenteur de mesure due au fait que les instruments utilisés étaient d'usage général, non adaptés à ce genre d'essais.

Les principaux perfectionnements à lui apporter sont du côté des instruments de mesure. Il faudrait utiliser des compteurs de Geiger de petites dimensions, si possible fixés au bac d'huile de façon à pouvoir faire la mesure pendant la marche de la machine d'usure sans être obligé de l'arrêter et de faire des transvasements de liquides salissants et visqueux. L'automatisme de la mesure aurait fait gagner du temps et aurait diminué la dispersion des résultats.

Cette méthode n'en demeure pas moins d'un grand intérêt. D'une part, c'est une nouvelle application des théories de la radioactivité artificielle qui ont rendu déjà d'inappréciables services à la mécanique. D'autre part, nous y avons trouvé un moyen de faire des mesures au bout de durées très courtes et de déceler de très faibles usures avec suffisamment de précision. C'est une méthode qui peut être très utile dans beaucoup d'essais de ce genre où le grand obstacle est l'impossibilité de remarquer des usures trop petites malgré des temps de fonctionnement très longs.

5 - PERSPECTIVES D'AVENIR -

L'étude des phénomènes d'usure est vaste et complexe; ce travail n'a nullement l'intention d'en épuiser le sujet. Il constitue peut-être une contribution à cette étude, mais nous montre surtout l'ampleur de ce problème et les multiples obstacles auxquels se heurteront ceux qui voudront y travailler.

Beaucoup de choses, en effet, sont à faire dans ce domaine où les lacunes, dans les connaissances des techniciens, sont nombreuses. Il manque aux constructeurs les tableaux et les abaques relatifs à l'usure qui sont indispensables dans leurs calculs. Il reste à étudier le comportement d'autres engrenages plus complexes, dans d'autres matières plastiques, accouplés avec des pignons métalliques ou plastiques, dans des conditions de travail plus diverses.

Le travail entrepris ici nous ouvre cependant la voie sur les possibilités d'étude rationnelle et scientifique de cette partie de la mécanique qui, pour être un objet de recherches depuis fort longtemps, n'en est pas moins restée, la plus souvent, dans le domaine de l'empirisme.



B I B L I O G R A P H I E

- E. SPIRE et L. BARNIER. "L'usure des fontes et bâtis de machines-outils" (Machines et Métaux
Février 1948)
- E. BUCKINGHAM. "Surface fatigue of plastic materials" (Transaction of the A.S.M.E. Mai 1944)
- MM. OPITZ et HESSE. "Résistance et usure des roues d'engrenages en matières plastiques armées
(Kunststoffe - Septembre 1942)
- J. CAPELLE. "Cours pratique sur la théorie et la technologie des engrenages" (Edité en 1945-
1946 par la Société d'Etudes de l'Industrie de l'engrenage)
- G. HENRIOT. "La lubrification des engrenages" (Bulletin de la Société d'Etudes de l'Industrie
de l'Engrenage n° 10)
- S.Mc. Kee. "An identification method for measuring wear" (Journal of Research Août 1947)
- P. DUBOIS. "L'emploi rationnel des matières plastiques" (Industries des plastiques, n° 10, 11
12; 1946 - n° 1 1947)
- MM. L'HERMITE et BAUMARTEN. "Recherches expérimentales sur l'élasticité, la plasticité et le
frottement interne des plastiques chimiques" (Bulletin n° 10 du
"Groupement Français pour le développement des recherches aéro-
nautiques").
- R. de FLEURY. "Caractéristiques comparées des matériaux métalliques et des plastiques"
(Machines et Métaux, Avril 1947)
- R. CAZAUD. "Recherches sur la fatigue des aciers" (Publications scientifiques et techniques
du Ministère de l'Air, 1934)
- TIMOSHENKO. "Théorie de l'élasticité" (Ch. Béranger Editeur)
- P. PINOTTI, D. HULL, E. Mc LAUGHLIN. "Radioactive tracers in research on engine wear" (The
Petroleum engineer, Juin 1949)
- BF GOODRICH C° "Atome you can use" (Modern Industry, Janvier 1952)
- J. BURWELL et C. STRONG. "Radioactive tracers reveal friction and wear of metals" (Metal
progress, Sept. 1952)
- E. MERCHANT et E. KRABACHER. "Radioactive tracers for rapid measurement of cutting tool
life" (Journal of applied physics U.S.A., Déc. 1951)

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'USURE DES ENGRENAGES

EN RESINES SYNTHETIQUES STRATIFIEES

Plan

	Pages
INTRODUCTION	I
A - GENERALITES SUR LES PHENOMENES D'USURE	
CHAPITRE I - Diverses méthodes d'étude de l'usure des engrenages	7
CHAPITRE II - Etude de la dispersion des résultats d'essais	17
CHAPITRE III - Elasticité des matériaux employés	25
B - ETUDE DU PHENOMENE D'USURE	
CHAPITRE IV - Méthode expérimentale utilisée	43
CHAPITRE V - Usure d'engrenages en phénol formaldéhyde à base de toile (P 44 classe 2). Roulement avec glissement	51
CHAPITRE VI - Usure d'engrenages en phénol formaldéhyde à base de toile (P 44 classe 2). Roulement sans glissement	63
CHAPITRE VII - Usure d'engrenages en phénol formaldéhyde à base de toile (P 44 classe 1)	67
CHAPITRE VIII - Usure d'engrenages en phénol formaldéhyde à base de feuilles de bois	73
C - ETUDE DES CONDITIONS DE CONTACT DES DENTURES	
CHAPITRE IX - Etude de l'état de surface des dentures	81
CHAPITRE X - Le problème du lubrifiant	89
CHAPITRE XI - Etude théorique des contraintes au point de contact	93
CHAPITRE XII - Etude du contact par la méthode des jauges à fil résistant	97
CHAPITRE XIII - Etude du contact par photoélasticimétrie	105
D - ETUDE DES FAIBLES USURES PAR L'UTILISATION D'ISOTOPES RADIOACTIFS	
CHAPITRE XIV - La méthode des traceurs radioactifs appliquée aux phénomènes d'usure	112
CHAPITRE XV - Détermination des usures sur des phénoplastes stratifiés par les travaux radioactifs	133
CHAPITRE XVI - Perfectionnements apportés à cette méthode	141
E - CONCLUSIONS	
CHAPITRE XVII - Méthode de calcul de la résistance des engrenages à l'usure	151
CHAPITRE XVIII - Appréciations sur les différentes méthodes étudiées	155

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

LES RADIO-ISOTOPES EN MECANIQUE

Vu et approuvé

Paris, le 6 Juin 1952

Le Doyen de la Faculté des Sciences

A. CHATELET

Vu
et permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie
de Paris.

JEAN SARRAILH

FACULTE DES SCIENCES

Nom du Candidat : EZRAN

Prénom : Maurice

Date de la soutenance : 11 Juin 1952

Numéro d'Ordre : 378

EZRAN (Maurice)

Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées -

Fort d'Issy, Impr. du S.D.R.,
1952, In-4°, 166 pages, Fig.

Th. Ing. Doc. Paris 1952, N° 378

EZRAN (Maurice)

Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées -

Fort d'Issy, Impr. du S.D.R.,
1952, In-4°, 166 pages, Fig.

Th. Ing. Doc. Paris 1952, N° 378

EZRAN (Maurice)

Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées -

Fort d'Issy, Impr. du S.D.R.,
1952, In-4°, 166 pages, Fig.

Th. Ing. Doc. Paris 1952, N° 378

EZRAN (Maurice)

Contribution à l'étude de l'usure des engrenages en résines synthétiques stratifiées -

Fort d'Issy, Impr. du S.D.R.,
1952, In-4°, 166 pages, Fig.

Th. Ing. Doc. Paris 1952, N° 378

